This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

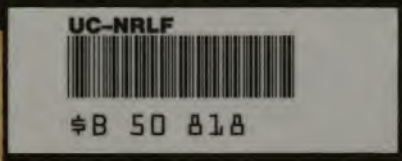
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

QC
929
F7B3



YC 40004

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
RECEIVED BY EXCHANGE
Class

Versuche über Entstehung von Nebel und dessen optische Eigenschaften bei Wasserdampf und einigen anderen Dämpfen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen philosophischen Fakultät der Universität Marburg

vorgelegt von

Erich Barkow
aus Elberfeld.

Mit einer Figurentafel und zwei Figuren im Text.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

MARBURG
Buchdruckerei von Joh. Hamel
1906

QC929
F7B3

Angenommen von der Fakultät am 4. März 1906.
Referent: Prof. Dr. Richarz

Meinen lieben Eltern.

186886

Inhaltsübersicht.

I. Einleitung. Seite

1. Über Kondensation von Dämpfen im allgemeinen 5
2. Einfluß der Krümmung des Tropfens 6
3. Einfluß der Jonen 10
4. Über die „Homogenität" des Nebels 13

II. Versuchsanordnung. 15

III. Versuche über die Entstehung von Nebel.

A. Versuche mit Wassernebel.

1. Einwirkung eines elektrischen Wechselfeldes . . . 19
2. Einwirkung von Röntgenstrahlen 23
3. Einwirkung von ultraviolettem Licht 25
4. Einwirkung elektrischer Spitzenentladung 28
5. Einwirkung des elektrischsen Funkens 30
6. Wirkung von radioaktiven Substanzen 32
7. Versuche mit Ozon 34
8. Untersuchung des blauen Nebels.
   a. Seine Entstehung 43
   b. Seine Zusammensetzung 48
9. Untersuchung von Sauerstoff-Stickstoff-Verbindungen 53

B. Untersuchung von andern Dämpfen und Gasen.

1. Benzol in Wasserstoff 56
2. Schwefelkohlenstoff in Wasserstoff 57

IV. Besondere Versuche über die optischen Eigenschaften des Nebels.

1. Größenbestimmung der Tropfen auf optischem Wege . . 60
2. Kontrolluntersuchungen an Staubplatten 65
3. Über einige Besonderheiten des Beugungsbildes 67

Nachtrag 70

Literatur-Verzeichnis 72

Figurennachweis siehe Tafel am Schluß.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

I. Einleitung.

1. Über Kondensation von Dämpfen im allgemeinen.

Die Spannkraft der gesättigten Dämpfe ist eine Funktion der Temperatur und nimmt zu mit steigender Temperatur. Durch Abkühlung kann man also einen Teil des Dampfes in flüssiger Form niederschlagen. Das läßt sich am leichtesten und bequemsten durch adiabatische Ausdehnung des Dampfes erreichen. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, daß die „spezifische Wärme des gesättigten Dampfes"*) negativ sein muß, wenn Ausscheidung von Flüssigkeit sattfinden soll.

Zwei Methoden sind angewandt worden, um die Kondensation von Dämpfen zu untersuchen, die Dampfstrahlmethode und die Entspannungsmethode.

Die erste besteht darin, daß man den durch Sieden der betreffenden Flüssigkeit erzeugten Dampf durch eine enge Öffnung in die freie Luft oder in ein anderes Gas ausströmen läßt.

Die zweite besteht darin, daß man eine Mischung irgend eines Gases mit dem zu untersuchenden Dampf sich plötzlich ausdehnen läßt.

Die Dampfstrahlmethode hat den Vorzug, daß sie sich leicht überall anwenden läßt, und den Nachteil, daß ihre Empfindlichkeit von vielen äußeren Bedingungen abhängig ist: der Beschaffenheit der umgebenden Luft, der

*) Siehe z. B. H. v. Helmholtz, Bd. VI, S. 236.

Ausströmungsgeschwindigkeit des Dampfes, der Ausströmungsöffnung etc. (L.-V. 103.)*)

Von vielen dieser Mängel kann man sich frei machen, indem man den Dampfstrahl mit einem Mantel umgibt, wie es zuerst Aitken (L.-V. 2, 13, 17) getan hat. Am weitesten ausgebildet ist dies Verfahren von Barus (L.-V. z. B. 34, 35). Ferner sind beim Dampfstrahl die Temperatur und damit die Kondensationsbedingungen von Punkt zu Punkt verschieden, während bei der Entspannungsmethode dieselbe Temperatur im ganzen Beobachtungsgefäß zu gleicher Zeit erreicht wird. Dies hat für viele qualitative und quantitative Messungen einen großen Vorteil.

Wie zuerst Coulier (L.-V 49) fand, genügt aber adiabatische Abkühlung allein nicht, um Nebel zu erzeugen: in reiner, „dunstfreier" Luft bildet sich kein Nebel. Es müssen also „Kerne" vorhanden sein, an denen sich das Wasser kondensieren kann. Nach den Untersuchungen von Coulier, Mascart, Aitken, Kießling, R. v. Helmholtz, Richarz, Bidwell, Lenard, J. J. Thomson, Barus, C. T. R. Wilson, Lemme, Schaum, Uhrig, Günckell können als solche Ansatzkerne Staub und Jonen dienen.

2. Einfluß der Krümmung des Tropfens.

Der theoretischen Erklärung für die Tatsache, daß in staubfreier Luft die Nebelbildung erschwert ist, liegt eine zuerst von Sir William Thomson (Lord Kelvin) angestellte Überlegung zu Grunde. (L.-V. 109.) Er zeigte nämlich, daß die Dampfspannung über gekrümmten Flächen verschieden ist von der über ebenen Flächen derselben Flüssigkeit, und zwar ist sie größer über konvexen Flächen und geringer über konkaven Flächen.

Aus anderen Erwägungen heraus kam später R. v. Helmholtz (L.-V. 58) zu denselben Schlüssen.

*) L.-V. Nr. . . . bedeutet hier und im folgenden den Hinweis auf das Literatur-Verzeichnis am Schlusse der Arbeit.

Sir William Thomson schlägt hierbei folgenden Gedankengang ein.*)

Taucht ein Kapillarrohr in eine Flüssigkeit, so steigt oder sinkt in ihm die Flüssigkeit, je nachdem das Rohr benetzt wird oder nicht. Nehmen wir an, die Flüssigkeit erleide eine Depression (Fig. 1); weiter befinde sich über der

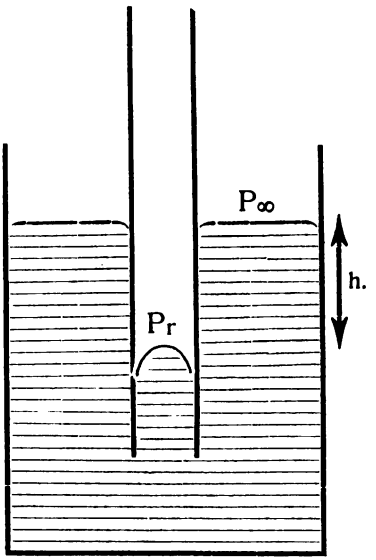


Fig. 1.

Flüssigkeit nur ihr eigener Dampf. Die Dampfsäule über dem Meniskus und ebenso ihr Druck an dessen Oberfläche ist dann größer als die entsprechenden Größen über der ebenen Fläche. Wäre nun die Sättigungsspannung des vom Meniskus entwickelten Dampfes gleich derjenigen von der ebenen Fläche, so wäre der Außendruck über dem Meniskus größer, als dieser Sättigungsdruck. Es müßte sich also auf dem Meniskus der Dampf kondensieren, da der Sättigungsdruck überschritten ist. Dieser Prozeß würde so lange dauern, bis die Niveaudifferenz ausgeglichen wäre. Dies geschieht aber wegen der Wirkung der Kapillarkräfte tatsächlich nicht. Es müßte also ein dauernder Strom von

*) Siehe auch Helmholtz, Vorl. Bd. VI, S. 336, u. L.-V. 46.

Dampf in das Kapillarrohr hinein stattfinden und dementsprechend unten herum ein Flüssigkeitsstrom aus dem Kapillarrohr heraus. Wir hätten also mit andern Worten ein Perpetuum mobile; das ist nicht möglich. Folglich ist unsere obige Annahme, daß die Sättigungsspannung über der ebenen Oberfläche und dem Meniskus gleich sei, falsch. Wie man leicht sieht, ist Gleichgewicht nur vorhanden, wenn der Sättigungsdruck p_r über dem Meniskus größer ist als über der ebenen Oberfläche p_∞.

Die entsprechenden Überlegungen kann man natürlich auch für benetzende Flüssigkeiten anstellen.

Der Druckunterschied $p_r - p_\infty$ ist gleich dem Gewicht einer Dampfsäule von der Höhe h, dem spezifischen Gewicht σ und dem Querschnitt 1.

Also:

$$p_r - p_\infty = h \cdot \sigma \cdot g$$

h ist die kapillare Steighöhe,

$$h = \frac{2T}{r \cdot g \cdot s},$$

wobei T die Kapillarkonstante, r der Radius des Kapillarrohres, s die Dichte der Flüssigkeit ist. Setzen wir dies ein, so erhalten wir:

$$p_r - p_\infty = \frac{2T\sigma}{r \cdot s}.$$

Diese Ableitung gilt jedoch nur, wenn h verhältnismäßig klein ist, sodaß man σ, die Dichte des Dampfes, als konstant ansehen kann. Für größere Höhendifferenzen ist σ mit der Höhe veränderlich.

Um die genauere Formel abzuleiten, denken wir uns eine so kleine Höhendifferenz, daß wir σ konstant annehmen können. In den Höhen z und $z + dz$ ist der Druck entsprechend p und $p + \frac{dp}{dz} dz$. Beide unterscheiden sich um das Gewicht der Dampfsäule vom Querschnitt 1,

also um $\sigma \,.\, dz \,.\, g$. (g ist die Schwerebeschleunigung). Also:

$$p - (p + \frac{dp}{dz} dz) = \sigma \,.\, dz \,.\, g,$$

$$\frac{dp}{dz} = - \sigma \,.\, g.$$

Nehmen wir nun an, daß für die gesättigten Dämpfe das Boyle-Mariottesche Gesetz gilt, so können wir setzen:

$$\frac{p}{p_\infty} = \frac{v_\infty}{v} = \frac{\sigma}{\sigma_\infty}.$$

p_∞, v_∞, σ_∞ sind die Werte, die p, v und σ an der ebenen Flüssigkeitsoberfläche haben.

$$\sigma = \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} p.$$

Setzen wir dies ein, so erhalten wir:

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} \,.\, p \,.\, g,$$

$$\frac{dp}{p} = - \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} \,.\, g \,.\, dz.$$

Integrieren wir zwischen den entsprechenden Grenzen von unten nach oben in Figur 1,

$$\int_{p_r}^{p_\infty} \frac{dp}{p} = - g \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} \int_{-h}^{0} dz,$$

so erhalten wir

$$\lg \frac{p_r}{p_\infty} = \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} \,.\, g \,.\, h.$$

Für h setzen wir wieder $h = \frac{2\,T}{r \,.\, s \,.\, g}$ und erhalten:

$$\lg \frac{p_r}{p_\infty} = \frac{\sigma_\infty}{p_\infty} \,.\, \frac{2\,T}{r \,.\, s}.$$

Setzen wir noch $p_\infty \,.\, v_\infty = \frac{p_\infty}{\sigma_\infty} = R \,.\, \vartheta$ in die vorige Gleichung ein, so ergiebt sich:

$$R \,.\, \vartheta \lg \frac{p_r}{p_\infty} = \frac{2\,T}{r \,.\, s}.$$

Dies ist dieselbe Formel, die R. v. Helmholtz (L.-V. 58) auf einem ganz anderen Wege abgeleitet hatte.*)

Da bei einer konvexen Fläche r positiv zu rechnen ist, so ist die rechte Seite der Gleichung positiv, also $p_r > p_\infty$. Bei konkaven Flächen ist r negativ zu rechnen, also ist hier $p_r < p_\infty$.

Der Unterschied zwischen p_r und p_∞ wird um so größer, je kleiner r ist, ja bei unendlich kleinem r sogar unendlich groß, vorausgesetzt, daß die Formel soweit gilt. Da die Tröpfchen des Nebels bei ihrem Entstehen außerordentlich klein sind, so sieht man, daß die Bildung der ersten Tröpfchen sehr erschwert, wenn nicht unmöglich gemacht wird; denn ein sehr kleines Tröpfchen würde sehr schnell wieder verdampfen. Doch können auch sehr kleine Tropfen wieder im Gleichgewicht sein, auch ohne Ladung, denn nach den Versuchen von Reinold und Rücker an sehr dünnen Schichten nimmt die Oberflächenspannung von einer gewissen Schichtdicke wieder ab (Siehe z. B. L.-V. 107. S. 152).

Es werden also alle die Vorgänge die Nebelbildung begünstigen, die den Dampfdruck herabzusetzen vermögen. Es erleichtert z. B. Staub die Kondensation; denn die Staubteilchen bieten facettenweise schwächer gekrümmte, vielleicht sogar ebene und in ihren kapillaren Ritzen konkave Flächen dem sich kondensierenden Dampfe dar.

Andererseits erniedrigen Salzlösungen, hygroskopische Substanzen usw. den Dampfdruck und befördern so die Kondensation des Dampfes.

3. Einfluß der Jonen.

Auch elektrische Einflüsse können die Dampfspannung herabsetzen. Ein homogenes elektrisches Feld hat nur sehr wenig Einfluß auf die Spannung des Dampfes nach J. J. Thomsons Untersuchungen (L.-V. 108). Dagegen ist

*) Siehe auch H. v. Helmholtz, Vorl. Bd. VI, in der Mitte von S. 334.

ein nicht homogenes Feld, wie es z. B. um Jonen vorhanden ist, der Kondensation förderlich.

Haben wir in einem Dampfraum einen ursprünglich ziemlich großen Tropfen mit elektrisch geladenem Kern, so wird er wegen seiner Krümmung verdampfen und sein Radius abnehmen. Da die Elektrizitätsmenge im Kern des Tropfens dieselbe bleibt, so wird die elektrische Anziehung, welche auf die Wasserteilchen an der Tropfenoberfläche wirkt und diese festzuhalten strebt, umgekehrt dem Quadrate des Radius zunehmen. Da das dieser Anziehung entgegenwirkende Verdampfungsbestreben umgekehrt proportional der ersten Potenz des Radius wächst, also langsamer, so sieht man, daß bei einer bestimmten Tropfengröße Gleichgewicht herrschen muß, und die Verdampfung aufhört. Bei größerem Radius verdampft der Tropfen, bei kleinerem wird er sich vergrößern.

Hat ein Wassertropfen die Ladung eines Elementarquantums, und ist $T = 76$, d. h. ist die Kapillarkonstante dieses kleinen Tropfens gleich der für eine dicke Wasserschicht, so ergibt sich nach J. J. Thomsons Rechnungen (L.-V. 107, Seite 150) für den Gleichgewichtsradius, $r = \frac{1}{3{,}2 \cdot 10^7}$. Weiter berechnet J. J. Thomson, wie groß für diesen Wert die Übersättigung $\frac{p_r}{p_\infty}$ sein muß, damit der Tropfen zu beträchtlicher Größe anwachsen kann. Er findet $\frac{p_r}{p_\infty}$ ungefähr gleich 3,5. C. T. R. Wilson (L.-V. 116, 119, 125, 130) fand für diesen Wert experimentell ungefähr 4. Mit Rücksicht darauf, daß das Boyle-Mariotte'sche Gesetz für gesättigte Dämpfe als gültig angenommen wurde, und daß für diese kleinen Tropfen $T = 76$ gesetzt wurde, ist die Uebereinstimmung sehr befriedigend.

Für Dämpfe anderer Flüssigkeiten werden wir andere Werte bekommen, wie auch Donnan (L.-V. 53) durch Versuche gezeigt hat.

Nach C. T. R. Wilson's (L.-V. 118, 123) Untersuchungen gelten die oben angeführten Zahlen nur für negative Jonen; für positive ergibt sich etwa 6 fache Übersättigung. Woher dieser Unterschied rührt, ist noch nicht genügend aufgeklärt; C. T. R. Wilson hält es für eine spezifische Eigenschaft der beiden Jonenarten. Eine Erklärungsmöglichkeit kann man vielleicht in 2 Punkten finden:

1. daß das elektrische Feld in unmittelbarer Nähe des negativen Jons, d. h. Elektrons, wegen dessen Kleinheit stärker ist, als um das positive Atomion. Der Tropfen wird also um das negative Elektron schneller wachsen und die Gleichgewichtsgröße erreichen, während der positive Tropfen schon vor Erreichung dieses Zustandes seine Ladung durch Vereinigung mit einem negativen Jon verliert.

2. Infolge ihrer anfänglichen größeren Beweglichkeit haben die negativen Jonen mehr Gelegenheit, sich mit Wassermolekeln zu vereinigen als die positiven (L.-V. 107. S. 153).

Daraus würde sich dann eine Verschiedenheit in der Größe der negativen und positiven Tropfen ergeben, woraus die Differenz der Expansionswerte verständlich wäre.

Daß positive und negative Jonen verschieden auf die Kondensation des Wasserdampfes wirken, zeigt schon ein Versuch von J. J. Thomson (L.-V. 105, 107. S. 145).

Unter Umständen sind es nicht die negativen Jonen, an denen sich zuerst Tropfen bilden, sondern die positiven, wie K. Przibram gezeigt hat. (Siehe Nachtrag).

Ein weiterer Beweis dafür, daß die Jonen sich mit andern Molekeln beladen, „Molionen" bilden, ergibt sich daraus, daß ihre Diffusionsgeschwindigkeiten geringer sind als die der neutralen Molekel; sie sind also größer und schwerer als diese. (L.-V. 107. S. 32 ff). Beladung mit Wasserdampfmolekeln wäre der Anfang der Tropfenbildung; und zwar ergibt eine Berechnung von Herrn

E. Pringal, der mit der Fortsetzung meiner Versuche beschäftigt ist, daß bereits ca. 10 Wasserdampfmoleküle dem Gewichte eines Tröpfchens ($r = \frac{1}{3{,}2 \cdot 10^7}$) entsprechen.

4. Über die »Homogenität« des Nebels.

Eine weitere Frage ist die nach der Beschaffenheit des Nebels. Die Bestimmung der Tropfengröße kann nach mehreren Methoden geschehen. Das Nähere hierüber siehe weiter unten Absch. IV. 1. Bei allen Methoden, abgesehen etwa von der direkten mikroskopischen Messung, ist es notwendig, daß der Nebel nach der Kießling'schen (L.-V. 70, 74) Definition „homogen" ist, d. h. daß alle Tropfen soweit von derselben Größe sind, daß sie farbenprächtige Beugungsbilder zeigen.

Wir wollen einen Nebel „homogen" nennen, wenn er Beugungsringe erkennen läßt.

Ob ein Nebel homogen wird, hängt, wie man sofort sieht, davon ab, ob die Kondensationskerne gleichartig und gleichmäßig verteilt sind, sodaß der Bereich, aus dem sie den Wasserdampf an sich reißen, immer gleich groß ist. Wenn wenig Kerne vorhanden sind, so werden die Tropfen verhältnismäßig groß. Da ihr Kondensationsbereich groß ist, so haben kleine Unterschiede hierbei wenig Einfluß auf die Tropfengröße. Bei größerer Zahl der Kerne werden die einzelnen Tropfen nicht mehr alle gleich groß werden, da hier die Verteilung, die doch nie ganz regelmäßig ist, einen bedeutend größeren Einfluß auf den Kondensationsbereich hat und damit auch auf den Tropfenradius. Der so entstandene Unterschied in der Tropfengröße wird seinen Einfluß auf das Beugungsbild dahin äußern, daß die von den einzelnen Tropfen erzeugten Beugungsbilder nicht mehr genau aufeinander fallen. Die Folge ist, daß das Beugungsbild an Schärfe verliert, seine Farbenreinheit beträchtlich abnimmt und sogar gänzlich verschwindet. Solche Nebel

könnte man dann nicht mehr homogen nennen, obwohl die absoluten Unterschiede der Tropfengröße dieselben oder sogar geringere sein könnten als bei größeren Tropfen, die bei denselben absoluten Größenunterschieden doch noch Beugungserscheinungen zeigen.

Geht man von einem anderen Kriterium für gleiche Tropfengröße aus, so könnte man diese Nebel doch homogen nennen. Denn wenn die Tropfen gleiche Größe haben, so fallen sie mit gleicher Geschwindigkeit (s. Absch. IV. 1), was man daran erkennt, daß ein solcher Nebel sich mit scharfer oberer Grenze senkt. Diese Erscheinung kann eintreten, ohne daß farbenprächtige Beugungsbilder auftreten. Letztere sind also ein schärferes Kriterium für Homogenität des Nebels als jene Erscheinung.

In den folgenden Untersuchungen ist auf die optischen Eigenschaften des entstehenden Nebels, insbesondere seine Homogenität, stets besonderes Augenmerk gerichtet worden.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

II. Versuchsanordnung.

Zur Untersuchung der Nebelbildung wandte ich die Entspannungsmethode an. Das Nebelgefäß (Figur 2) (siehe Tafel am Schluß der Arbeit) bestand aus einer Glaskugel A, die durch einen Gummistopfen mit drei Durchbohrungen verschlossen war. Die Entspannung wurde hervorgerufen durch Verbindung mit einem evakuierten Gefäß V. Das etwa 1 cm weite Verbindungsrohr zwischen V und A trug einen Metallhahn H_1 mit weiter Bohrung. Der Druck in A wurde an dem Quecksilbermanometer M_1 abgelesen. Das Gefäß V, das die verdünnte Luft enthielt, war eine Kugelflasche aus Glas von 40 cm Durchmesser; der Grad der Luftverdünnung konnte an dem Metallvakuummeter M_2 abgelesen werden. V stand durch R mit einem großen luftverdünnten Raum, bestehend aus 5 Kugelflaschen von 30 cm Durchmesser, in Verbindung. In diesem wurde die Luft durch eine Wasserstrahlluftpumpe oder durch eine zweistieflige Ventilluftpumpe bis auf einen an dem Quecksilbermanometer M_3 ablesbaren Druck verdünnt.

Diese komplizierte Einrichtung wurde getroffen, um eine längere Versuchsreihe unter denselben Bedingungen ausführen zu können, ohne für Erneuerung der Luftverdünnung Sorge tragen zu müssen.

Nachdem die Luft aus dem Vakuumreservoir R ausgepumpt war, konnte durch einfache Öffnung des Hahns H_3 das Gefäß V bis auf den gewünschten Druck gebracht werden.

Dann wurde H_3 geschlossen und H_1 geöffnet, bei geschlossenem H_2. Dadurch wurde der Druck in A vermindert.

Durch Probieren ließ sich leicht herausfinden, wie groß der Druck in V sein mußte, um in A die gewünschte Entspannung zu erhalten. In V wurde dann durch Öffnung von H_3 wieder der vor dem Versuch herrschende Druck hergestellt. Die aus A abgesaugte Luft wurde nach einem Versuch durch Luft ersetzt, die durch das Wattefilter F_2 gegangen war.

Bei allen folgenden Versuchen war es von größter Wichtigkeit, daß die Luft in A vollkommen gesättigt war. Wenn die Versuche schnell hintereinander gemacht wurden, genügte dazu nicht, daß sich in A eine Wassermenge W befand. Es wurde daher folgende Einrichtung getroffen. (Fig. 3.) (Siehe Tafel am Schluß der Arbeit.)

In einer größeren Kochflasche K wurde Wasser zum Sieden gebracht. Die Luft strömte in der in der Figur angedeuteten Richtung ein und mischte sich mit dem heißen Wasserdampfe. Das Gemisch strömte weiter in die Woulff'sche Flasche C_1, wo sich ein großer Teil des kondensierten Wassers absetzen konnte, durch den Glaswollefilter F_1 in die zweite Woulff'sche Flasche C_2, in der sich der Rest des kondensierten Wassers sammelte, und schließlich durch L und den Wattefilter F_2 (Fig. 2) in das Nebelgefäß A.

Auf ihrem langen Wege hatte sich die heiß gesättigte Luft wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt und war nun natürlich erst recht vollkommen mit Wasserdampf gesättigt. Das Durchpressen der Luft durch diese Sättigungsvorrichtung und die Filter besorgte die Saugwirkung des luftverdünnten Raumes in A.

Das Filter F_2 bestand aus einem 35 cm langen, 3 cm weiten Glasrohr, das auf beiden Seiten mit durchbohrten Gummistopfen verschlossen und mit Watte dicht vollgestopft war.

Um die Wirksamkeit dieses Filters zu prüfen, saugte ich durch dasselbe Flammengase von einem Bunsenbrenner in das Nebelgefäß, ohne eine Spur verstärkter Nebelbildung erkennen zu können; bei einem Versuche fing sogar die erste Watteschicht Feuer. Da Flammengase sonst bekanntlich sehr kräftig auf die Nebelbildung einwirken, so ergab sich, daß das Filter jede Spur von „Dunst" im weiteren Sinne, d. h. von Kondensationskernen, wegfing.

Anfänglich wird die Luft staubfrei gemacht, indem man sie 1 bis 2 Tage ruhig in dem Nebelgefäß sich selbst überläßt. Schneller kommt man zum Ziel, wenn man die Luft entspannt, den entstandenen Nebel sich setzen läßt, filtrierte Luft einläßt, wieder entspannt usw.

Nach einigen Wiederholungen dieses Verfahrens zeigen sich bei geringen Entspannungen bis ca. 15 cm Unterdruck nur ganz vereinzelte Tropfen, deren Bildung sich überhaupt niemals verhindern läßt. Dann ist die Luft staubfrei geworden.

Werden die Entspannungen größer als 15 cm, so zeigen sich mehr Tropfen, die bei sehr starken Entspannungen auch staubfreier Luft so zahlreich werden, daß sie einen dichten Nebel bilden, der sogar Beugungsringe zeigt.

Eine Druckverminderung von 15 cm entspricht einem Verhältnis $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$, wobei v_1 das ursprüngliche Volumen und v_2 das größere Volumen ist. Wie C. T. R. Wilson (L.-V. 116, 118, 128) gezeigt hat, kondensiert sich das Wasser nur an negativen Jonen bei dieser Entspannung; wenn $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}31$ ist, dienen auch positive Jonen als Kondensationskerne. Bei $\frac{v_2}{v_1} > 1{,}38$ zeigt sich ein sehr dichter Nebel, der aus ungeladenen Tropfen besteht, und dessen Dichte mit zunehmender Entspannung zunimmt. $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}38$ entspricht ca. 21 cm Entspannung. Diese Nebel treten immer auf und lassen sich nicht beseitigen; sie sind die

„normalen" Nebel. Der ungeladene Nebel zeigt auch schon deutliche Beugungsringe. Barus (L.-V. 31)*) hat beobachtet, daß erst bei einer Entspannung von 26 cm eine sehr beträchtliche Vermehrung der Tropfenzahl eintrat. Ich selbst habe das nie beobachten können, vielmehr nur, daß bei 21 cm Druckerniedrigung dichterer Nebel auftrat. Auch die außerordentliche Steigerung der Nebeldichte und damit die rapide Vergrößerung der Beugungsringe, wie es C. T. R. Wilson (L.-V. 116, Seite 285) beschreibt, habe ich nie wahrnehmen können. Selbst bei Druckdifferenzen von 40 cm und mehr trat bei mir nie ein so dichter Nebel auf, daß das zentrale Feld gefärbt gewesen wäre. (Siehe unten Absch. IV. 1.)

Es mag dies seine Ursache darin gehabt haben, daß Wilson sehr kleine Gefäße benutzte, in denen sich der Einfluß der Wände sehr stark bemerkbar macht.

Demgegenüber ist der Einfluß der Wände bei den großen Gefäßen, wie ich sie anwandte, etwa 20 cm Durchmesser, ganz zu vernachlässigen.

*) Siehe auch Physical Review. 1906. S. 82—110.

III. Versuche über die Enstehung von Nebel.

A. Versuche mit Wassernebel.

1. Einwirkung eines elektrischen Wechselfeldes.

Den Anlaß zu diesen Versuchen gab eine Bemerkung von Lummer (L.-V. 90), wonach ein „elektrischer Nebel" nicht homogen sei und also auch keine Beugungsringe zeige. Bei der näheren Untersuchung dieser Frage fand ich (L.-V. 75 und 78), daß zwar bei der ersten Entspannung der Nebel nicht homogen war, wohl aber bei den folgenden.

Die Versuchsanordnung war die oben beschriebene. Das Nebelgefäß ruhte auf einer großen Hartgummiplatte zwischen zwei Metallplatten. Die Platten waren an Holzklötzen befestigt und standen so auf der Hartgummiplatte. Zur Erzeugung des Wechselfeldes wurden sie mit den Polen eines Induktoriums verbunden. Der Abstand der Platten betrug 21 cm, die Schlagweite des Induktors 12 cm. Als Unterbrecher diente zuerst ein Quecksilberunterbrecher und später ein Wehneltunterbrecher, der in späterer Zeit immer benutzt wurde, weil seine Wirkung in derselben Zeit intensiver war. Prinzipiell dieselbe Anordnung wurde übrigens schon von F. Richarz (L.-V. 62. S. 175 ff) bei den Untersuchungen über den Dampfstrahl angewandt, ebenso später auch von Barus (L.-V. 34).

Nach dem Ingangsetzen des Induktoriums gehen zwischen den Platten und den ihnen zunächst liegenden

Teilen des Nebelgefäßes zahlreiche Lichtbüschel über. Im Innern des Beobachtungsgefäßes selbst sind keine Lichterscheinungen wahrnehmbar.

Nachdem die Luft auf diese Weise etwa 10 sec. elektrisiert wurde, wurde eine Entspannung vorgenommen. Der entstandene Nebel ist irisierend, d. h. wenn man durch ihn gegen eine entfernte Lichtquelle sieht, so tritt ein einige Zeit anhaltender, schneller Wechsel zwischen hauptsächlich roten und grünen Farbentönen ein. Dabei ist der Nebel in stark wirbelnder Bewegung. Allmählich hören die Wirbel und damit auch das Irisieren auf, und es zeigt sich nur die Lichtquelle von einem braunroten Ring umgeben. Diese Erscheinung zeigt deutlich, daß nur in kleinen Partieen des Nebels die Tropfen gleiche Größe haben, und jede von diesen zeigt eine besondere Farbe; durch die wirbelnde Bewegung werden sie abwechselnd in die Sehrichtung gebracht und rufen so das Irisieren hervor. Dieser inhomogene Nebel setzte sich verhältnismäßig schnell.

Es blieb aber, nachdem der gewöhnlich sichtbare Nebel verschwunden war, noch ein feiner blauer Nebel übrig, der nur in dem Lichtkegel einer Bogenlampe bei sonst verdunkeltem Zimmer sichtbar war. Der blaue Nebel trat hin und wieder auch ohne jegliche Entspannung auf, besonders dann, wenn die Elektrisierung sehr stark war. Er verschwand auch dann nicht, wenn nach der Entspannung wieder filtrierte Luft zuströmte, und dadurch adiabatische Erwärmung stattfand. Ebenso senkte er sich nicht merklich und war noch sehr lange nach seinem Entstehen vorhanden. Er besteht aus außerordentlich kleinen Tröpfchen, wie man aus seiner geringen Fallgeschwindigkeit, seiner blauen Farbe und aus dem Fehlen von Beugungserscheinungen erkennt; seiner Dichtigkeit nach zu urteilen, müßte er Beugungserscheinungen zeigen, da viel weniger dichte Nebel sie sonst hervorbringen. Auf seine Entstehungsart und seine wahrscheinliche Zusammensetzung werde ich noch zu sprechen kommen.

Jedenfalls hängt mit seiner Bildung die Stärke des nachher bei der Entspannung entstehenden Nebels zusammen; denn wenn der Entspannungsnebel stark ist, so war auch vorher der blaue Nebel deutlich zu sehen, im andern Falle ist er kaum oder garnicht wahrnehmbar. Vermutlich ist immer etwas Ähnliches vorhanden, denn sonst läßt sich die Entstehung von Nebel bei geringen Entspannungen unter 15 cm schwer erklären. Nach den Untersuchungen C. T. R. Wilsons (L.-V. 118) und anderer tritt die Kondensation an Jonen nur bei Entspannungen größer als 15 cm auf; außerdem nimmt die Kondensationsfähigkeit der Jonen sehr schnell mit der Zeit ab, einige Sekunden genügen schon, sie inaktiv zu machen. Hier jedoch halten sich die Kondensationskerne viele Stunden. Also können es nicht die Jonen in eigentlichem Sinne sein, die hier die Kondensation hervorrufen, sondern höchstens ein sekundäres Erzeugnis der Jonisation. Dafür spricht auch noch die Tatsache, daß die Zahl der Kerne auch noch nach dem Aufhören der Elektrisierung einige Sekunden lang zunimmt, während die Jonenzahl rapide abnimmt, wie Rutherford durch Leitfähigkeitsuntersuchungen gezeigt hat. (L.-V. 107, S. 19.) Wenn ich nämlich sofort nach dem Aufhören des Elektrisierens entspannte, so war der entstehende Nebel schwach, wartete ich aber einige Sekunden, so nahm die Dichte des Nebels und die Zahl der Entspannungen, die nötig war, um die Kondensationskerne zu beseitigen, beträchtlich zu und nahm schließlich einen maximalen Wert an. Ganz allmählich nahm dann die Kernzahl ab, öfter waren aber noch nach etwa 15 Stunden eine größere Anzahl Kerne vorhanden, sodaß noch ziemlich kräftiger Nebel auftrat. Um von der erzeugten Kernzahl einen Begriff zu geben, sei angeführt, daß in einem Falle 22 Entspannungen nötig waren, um sie sämtlich zu entfernen. Die Zahl der notwendigen Entspannungen hängt natürlich auch von ihrer Größe ab. Eine geringe Druckverminderung bringt nur

wenig Kerne herunter, während eine starke viele ausfällt.

Ist der erste inhomogene Nebel verschwunden, so wird wieder staubfreie Luft zugelassen und von neuem entspannt. Der dann entstehende Nebel ist meistens homogen und zeigt prächtige Beugungsbilder. Ist auch dieser gesunken, so zeigt sich wieder der permanente blaue Nebel, wenn auch schwächer. Die folgenden Entspannungen zeigen im allgemeinen dieselben Erscheinungen, nur sind die Beugungsbilder anders gefärbt und kleiner, der blaue Nebel zeigt immer abnehmende Intensität und ist zuletzt nicht mehr wahrnehmbar. Schließlich ist der von der Größe der Entspannung abhängige Normalzustand erreicht, und das Nebelgefäß zu einem neuen Versuch vorbereitet.

Eine weitere Frage von großer Wichtigkeit ist die nach der Entstehung der Jonen in einem elektrischen Wechselfelde. Bekanntlich zeigt die Luft in normalem Zustande eine gewisse, wenn auch sehr geringe elektrische Leitfähigkeit, d. h. in ihr ist eine geringe Anzahl Jonen enthalten. Diese sogenannte Selbstionisation läßt sich folgendermaßen erklären: Die neutralen Molekeln bestehen aus positiven und negativen Bestandteilen, die um ihre Gleichgewichtslagen Schwingungen ausführen. Die neutralen Molekeln besitzen alle möglichen Geschwindigkeiten, die nach dem Maxwellschen Verteilungsgesetz angeordnet sind. Die mittlere Geschwindigkeit tritt am häufigsten auf, während extrem große oder kleine selten vorkommen. Treffen zwei Moleküle mit sehr großen Geschwindigkeiten zusammen, so können dadurch Molekülverbände gesprengt werden, und wir haben positive und negative Jonen. Wenn ihre Energie soweit abgenommen hat, daß sie sich wieder vereinigen können, so bilden sie wieder neutrale Molekeln. Es wird also immer nur eine gewisse kleine Zahl von freien Jonen vorhanden sein, die

von der Temperatur abhängt. (Siehe auch O. Rosenstock, Dissertation, Marburg 1906 (pag. 35—37).)

Haben wir nun Jonen zwischen zwei geladenen Platten, so werden sie sich auf die Platten zu bewegen und unter Einwirkung des elektrischen Feldes beschleunigt werden. Haben sie auf ihrer freien Weglänge genügend kinetische Energie erwerben können, so werden sie bei ihrem Zusammenstoß mit einem neutralen Molekül dasselbe zersprengen können.

Diese Art von Jonisierung ist jedoch unabhängig davon, ob wir ein elektrisches Wechselfeld haben.

Auch folgendes könnte noch zur Jonisierung beitragen: Die Schwingungen der elektrischen Bestandteile des Moleküls liegen in allen möglichen Richtungen. Setzt plötzlich ein elektrisches Feld ein, so können die Schwingungen des gebundenen Jons, die gerade in die Richtung der elektrischen Kraft fallen, so verstärkt werden, daß Zersprengung des Moleküls stattfindet. Eine Verstärkung durch Resonanz kann man hierbei nicht annehmen, da die Polwechsel des Induktoriums viel zu langsam sind im Verhältnis zu der Schwingungszahl im Molekül. (Auch bezüglich der stärkeren Wirksamkeit des Wechselfeldes siehe Rosenstock l. c. pag. 34 und 37—38.)

Auf die Entstehung des blauen Nebels werde ich später im Zusammenhang eingehen.

2. Einwirkung von Röntgenstrahlen.

Die Wirkung von Röntgenstrahlen auf die Kondensation des Wasserdampfes stellte zuerst Richarz (L.-V. 100, 101) fest. Zwischen der Röntgenröhre und dem Dampfstrahl befand sich ein großer Schirm aus Bleiblech, der zur Erde abgeleitet war, um die elektrischen Wirkungen der Röntgenröhre vom Dampfstrahl abzublenden. Die Strahlen gingen durch eine mit Aluminiumfolie verschlossene Öffnung des Schirms und erregten den Dampfstrahl.

C. T. R. Wilson (L.-V. 116, 117, 119, 120, 121) machte entsprechende Versuche mit entspannter feuchter Luft. Er fand, daß Verstärkung der Kondensation eintrat, und daß Jonen sie hervorriefen. Er und andere (L.-V. 107, S. 19) zeigten auch, daß die erzeugten Jonen nur eine Dauer von wenigen Sekunden hatten. J. J. Thomson fand (L.-V. 105), daß der bei der ersten Entspannung entstandene Nebel bei starker Strahlung nicht alle Jonen herunterbrachte und den übrigbleibenden eine größere Lebensdauer verlieh.

Auch Barus*) (L.-V. 34, S. 12 ff.) hat sich mit dieser Frage beschäftigt und erkannt, daß Röntgenstrahlen eine kräftige Wirkung auf den Dampfstrahl ausüben, und daß die Kerne noch nach 20 und mehr Sekunden nicht verschwunden sind, im Gegensatz zu den Versuchen C. T. R. Wilsons. Letzterer kann in seinen Resultaten auch hier durch den Einfluß der Wände seines engen Gefäßes gelitten haben.

Meine eigenen Versuche über diesen Gegenstand ergaben folgendes:

Zwischen dem Nebelgefäß aus Glas und der Röntgenröhre befand sich ein zur Erde abgeleiteter Aluminiumschirm. Das Induktorium hatte eine Schlagweite von etwa 15 cm und wurde mit Quecksilberunterbrecher getrieben. Selbst eine Expositionsdauer von $^3/_4$ Stunden ergab keine erhöhte Nebelbildung. Diesen Mißerfolg schrieb ich der zu schwachen Strahlung zu. Um möglichst starke Strahlung zu erhalten, nahm ich eine für Wehneltbetrieb konstruierte Röntgenröhre mit verstärkter Antikathode und beanspruchte sie bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Hierdurch gelang es mir, schon nach einer halben Minute Strahlungsdauer einen kräftigen Nebel zu erhalten, der deutlich sichtbare, auch objektiv darstellbare Beugungsringe zeigte. Die Größe der Entspannung betrug etwa 8 cm,

*) Neuere Versuche von Barus über diesen Gegenstand s. Physical Review 1906. S. 82—110.

war also weit geringer als bei Wilson. Ja, dieser sagt sogar (L.-V. 126) ausdrücklich, selbst sehr starke Strahlung beeinflusse nur die Tropfenzahl aber nicht die Größe der Entspannung. Das war also bei meinen Versuchen anders.

Da es sehr unwahrscheinlich ist, daß die Art der Jonen von der Stärke der Strahlung abhängig ist, so sind die bei diesen Versuchen auftretenden Kondensationskerne vermutlich keine Jonen, sondern etwas, das sekundär durch die Jonen entsteht, entsprechend dem blauen Nebel im vorigen Kapitel. Der einzige Unterschied würde der sein, daß der blaue Nebel sichtbar ist, während hier die primären Kerne nicht sichtbar sind. Wenn das Wechselfeld so kurze Zeit wirkt, daß der Nebel nur dem bei Röntgenstrahlen entstehenden an Dichte gleich ist, so ist auch dort der blaue Nebel noch nicht sichtbar. Auch in diesem Falle ist der bei der ersten Entspannung entstehende Nebel nicht ganz homogen.

Den Vorgang der Jonisierung könnte man sich etwa so vorstellen: Die Röntgenstrahlen sind wahrscheinlich elektrische Stöße, die von der Antikathode in den umgebenden Äther ausgesandt werden. Wir würden also ein Wechselfeld haben, das in ähnlicher Weise ionisiert, wie es auf Seite 22 beschrieben ist.

3. Wirkung von ultraviolettem Licht.

Daß ultraviolettes Licht die Nebelbildung in Wasserdampf begünstige, fanden zuerst Lenard und Wolf (L.-V. 82). Sie schrieben aber diese Wirkung einer durch das ultraviolette Licht hervorgerufenen Zerstäubung des Quarzfensters zu, das sie zwischen Lichtquelle und Dampfstrahl bezw. Nebelgefäß eingeschaltet hatten. R. v. Helmholtz und Richarz bekämpften diese Ansicht (L.-V. 62, S. 187) und führten als Grund für die Verstärkung der Kondensation die Jonisation der Luft an und zeigten zum Beisp., daß durch ultraviolettes Licht Ozonpapier in Luft gebläut wird. Durch viele Untersuchungen wurde dar-

getan, daß ultraviolettes Licht wirklich die Luft ionisiere, u. A. von Lenard selbst (L.-V. 84, 85) und C. T. R. Wilson (L.-V. 117, 121, 127), welche auch die Kondensationswirkung genau verfolgten.

Als Lichtquelle diente ihnen Bogenlicht zwischen Kohlen oder zwischen Zink und Kohle, wobei das wirksame Licht vom eigentlichen Lichtbogen ausgeht. Eine andere an ultravioletten Strahlen reiche Quelle ist das Funkenlicht zwischen Zink- oder Aluminiumelektroden. Die wirksamste Quelle ist wohl die Quecksilberbogenlampe aus Quarzglas, die von Heräus in Hanau hergestellt wird. Hierbei sind alle elektrischen Wirkungen und die starke Hitze, die dem Funkenlicht bezw. Lichtbogen anhaften, ausgeschlossen.

Das Nebelgefäß A (Fig. 2) wurde durch eine dreifach tubulierte Glaskugel A_1 ersetzt (Fig. 4); a entspricht dem a in Fig. 2; b wurde im vorliegenden Falle nicht gebraucht und war durch einen Gummistopfen verschlossen; c war durch eine mit Siegellack aufgekittete Quarzlinse Q bedeckt. Die Quecksilberbogenlampe war etwa 15 cm von Q entfernt.

Zuerst wurde A_1 in der bekannten Art und Weise staubfrei gemacht und dann ultraviolett bestrahlt. Bei der Entspannung entstand ein außerordentlich dichter, nicht homogener Nebel. Eine zwischen Lichtquelle und Quarzfenster gebrachte Glasplatte hebt jegliche Wirkung auf, also ist das ultraviolette Licht das Wirksame. Das zur Beleuchtung verwandte helle Bogenlicht hat nicht die geringste Nebelbildung zur Folge, da es seiner ultravioletten Strahlen durch die Kondensorlinsen der Bogenlampe und die Glaswand des Nebelgefäßes verlustig geht.

Der bei weiteren Entspannungen auftretende Nebel ist homogen und zeigt prächtige Beugungsfarben.

Dauert die Belichtung einige Minuten, so entsteht schon ohne Expansion ein dichter, fein bläulich glänzender Nebel, der bei starker Beleuchtung sichtbar ist. Im durchgehenden Lichte waren bei diesem bläulichen Nebel keine Beugungserscheinungen zu sehen; die Tröpfchen sind also

wohl zu klein dazu, vielleicht kleiner als Lichtwellen; denn mangelnde Zahl der Tröpfchen kann nicht Ursache des Ausbleibens der Beugungsfarben sein, vielmehr ist die Dichtigkeit bedeutend größer als bei vielen Nebeln, die Beugungsringe hervorrufen, wie der Augenschein zeigt. Der blaue Nebel ist geschichtet, und zwar sind abwechselnd Nebelschichten und nebelfreie Schichten. Im allgemeinen sind die etwa 1 mm breiten Schichten senkrecht zu den ultravioletten Strahlen angeordnet. Diese auch schon von C. T. R. Wilson (L.-V. 117, 121) und J. H. Vincent (L.-V. 114) beobachtete Erscheinung wäre noch genauer zu untersuchen, um ihre Entstehung erklären zu können. Im allgemeinen erinnert das Aussehen dieser Schichten an die Schichtung der positiven Lichtsäule in Geißlerschen Röhren. Der blaue Nebel, der hier entsteht, hat dasselbe Aussehen und wahrscheinlich auch dieselbe Entstehungsursache wie der blaue Nebel, der durch das Wechselfeld entsteht.

Auch hier ist die notwendige Entspannungsgröße so gering, daß man nicht primäre Jonen als Kondensationskerne annehmen kann, sondern durch Jonen gebildete Produkte.

Die Entstehung von Jonen durch ultraviolettes Licht kann man auf folgende Weise erklären. Die elektrisch geladenen Bestandteile des Moleküls führen um ihre Gleichgewichtslage Schwingungen aus. Treffen nun elektromagnetische Schwingungen auf dies System, deren Schwingungsdauer annähernd gleich der Eigenschwingung des Systems ist, so kann Resonanz eintreten. Dadurch werden die Schwingungen im Molekül so kräftig, daß es zersprengt wird. Licht ist nun nichts anderes als solche elektromagnetischen Ätherschwingungen. Wenn Licht elektrische Resonanz hervorruft, so muß es sehr stark absorbiert werden. Wie Lenard (L.-V. 84) gezeigt hat, ist für die Jonisation durch Licht Absorption erforderlich aber nicht hinreichend, wie

z. Beisp. Leuchtgas zeigt. Für Luft sind die Strahlen sehr großer Brechbarkeit, d. h. das äußerste Ultraviolett des Spektrums das Wirksame.

4. Einwirkung elektrischer Spitzenentladung.

Die erste Beobachtung über die Wirkung der Spitzenentladung auf die Kondensation des Wasserdampfes machte R. v. Helmholtz (L.-V. 59. 60, 61). Weiter untersucht wurde diese Erscheinung von R. v. Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62), Bidwell, Aitken (L.-V. 2), C. T. R. Wilson (L.-V. 117, 118, 121, 129), Lemme und Rebenstorff (L.-V. 98, 99). R. v. Helmholtz und F. Richarz hatten schon nachgewiesen, daß die Wirkung nicht herrühre von Staub oder Metallteilchen, die von der Spitze abgeschleudert würden, sondern daß es sich nur um die Wirkung von Jonen handeln könne. Ferner zeigten sie, daß das wirksame Agens eine, wenn auch kurze, Zeit seine Kondensationswirksamkeit beibehalte.

C. T. R. Wilson's Untersuchungen hatten folgendes Ergebnis. Es ist notwendig, daß die Spitze sichtbar leuchtet. Wird eine Entspannung vorgenommen, während die Spitzenausströmung noch fortdauert, so ist die für Jonen charakteristische Entspannungsgröße erforderlich, um Nebelbildung hervorzubringen. Wird dagegen erst entspannt, wenn die Spitzenentladung etwas vorher aufgehört hat, so ist die zur Nebelbildung notwendige Druckverminderung viel geringer. Es bilden sich also neue Kerne nach Aufhören der Spitzenentladung.

Rebenstorff fand jedoch, daß die von Wilson gefundenen Resultate sich nicht ganz mit den seinigen deckten, und schrieb die Abweichungen dem Umstand zu, daß Wilson mit sehr kleinen Räumen experimentierte. Er fand vor allen Dingen, daß die von der Spitze ausgehenden Kerne sich in Nebelringen bewegen, die auf einem Kegelmantel liegen. Die Kerne werden von der Spitze weg durch den elektrischen Wind an die Wände des Gefäßes

geschleudert und bleiben dort haften. Diese Art, einen Raum von Nebel und Staub zu reinigen, fanden unabhängig von einander Guitard (L.-V. 56), Nahrwold (L.-V. 95, 96, 97) und Lodge (L.-V. 86—89).

Die eben angeführten und auch meine eigenen Versuche stehen im Widerspruch zu einem Experiment, das R. v. Helmholtz (L.-V. 59, S. 4) angibt. Durch adiabatische Ausdehnung wurde Nebel erzeugt. „Es entsteht sofort nach dem Beginn der Elektrisierung ein nebelfreier Raum vor der Spitze, und innerhalb weniger Sekunden ist Nebel und Staub und alles, was in der Luft suspendiert war, in einer Art von Sturmwind hinweggefegt, und bleibt wahrscheinlich an den Wänden des Gefäßes haften. Von nun an ist es überhaupt (bis auf selten hinwegzubringende vereinzelte Kerne) unmöglich, Nebel in dem Raume zu bilden, es sei denn, daß frische Luft aus der Atmosphäre eingelassen werde."

Meine eigenen Untersuchungen über den Gegenstand waren nicht sehr ausgedehnt; indessen ergaben sie folgendes. Der Nebel bei der ersten Entspannung war nicht homogen, und erst bei weiteren Entspannungen traten kräftige Beugungsbilder auf. Die notwendige Größe der Entspannung war sehr gering, und die Kondensationskerne waren noch nach mehreren Stunden vorhanden. Dies würde auch wieder ein Beweis dafür sein, daß es nicht primär die Jonen sind, die die Nebelbildung hervorrufen.

Einen blauen Nebel, wie er bei dem Wechselfeld und dem ultravioletten Licht auftritt, konnte ich hier nicht bemerken. Vermutlich rührt es daher, daß er an seiner Entstehung durch den elektrischen Wind verhindert wird.

Die Beobachtung von Lemme (L.-V. 80), daß im Nebelgefäß ein feiner Nebel übrig bleibt, wenn sich der dichte Nebel gesetzt hat, läßt sich vielleicht mit dem blauen Nebel in Zusammenhang bringen.

5. Einwirkung des elektrischen Funkens.

Die Anregung zu diesen Versuchen gab eine am Vierwaldstättersee gemachte Beobachtung von Kießling (L.-V. 76), die er folgendermaßen beschreibt.

„Unmittelbar nachdem aus einer auf dem Uri-Rotstock lagernden, nach unten hin scharf begrenzten Gewitterwolke ein sehr hell leuchtender Blitz fast senkrecht zum Seeniveau sich entladen hatte, konnte ein genau der Blitzbahn entsprechender, schmaler grauer Regenstreifen beobachtet werden, der 8—10 Sekunden lang sich sehr deutlich von den dunkelviolett erscheinenden Felswänden abhob."

Es handelte sich bei den Versuchen darum, diese Erscheinung experimentell nachzumachen und die Bedingungen ihres Auftretens genauer zu untersuchen.

Als Versuchsgefäß diente eine Glaskugel, wie sie Fig. 5 zeigt. Der Tubulus a dient zum Entspannen und ist mit der Vorrichtung, die Fig. 2 zeigt, verbunden. Durch b und c führen durch Gummistopfen und Glasröhren gut isoliert zwei Drähte, die im Beobachtungsgefäß in 2 cm großen Messingkugeln endigen. Die Kugeln sind mit feinem Musselin oder Fließpapier umhüllt, die mit Wasser getränkt waren, um jegliche Zerstäubung des Metalls auszuschließen. Die beiden Drähte wurden mit den Polen eines Induktoriums von etwa 16 cm Schlagweite verbunden. Der selbsttätige Unterbrecher wurde ausgeschaltet; statt dessen wurde der Primärstrom durch einen Quecksilberkontakt geschlossen und geöffnet.

Ließ ich dann ohne weiteres einen 10 cm langen Funken in staubfreier Luft zwischen den Kugeln übergehen, so trat keine sichtbare Nebelbildung auf. Das Nebelgefäß wurde durch Bogenlicht hell beleuchtet, sodaß jede Spur von Nebel zu erkennen gewesen wäre. Wurde die Luft jetzt entspannt, so zeigte es sich, daß Kondensationskerne vorhanden waren. Der Nebel war nicht homogen, wie auch nach den auf S. 8 auseinandergesetzten Gründen zu er-

warten war; denn die Nebelkerne entstehen nur im Funken und brauchen längere Zeit, bis sie sich durch Luftströmungen gleichmäßig verteilen können.

Folgender Versuch aber hatte Erfolg. Die wieder kernfreie Luft wurde einer so kleinen Entspannung — etwa 4—5 cm Quecksilber — unterworfen, daß dadurch kein Nebel entstehen konnte; gleichzeitig damit ließ ich einen Funken übergehen. Es zeigte sich dann zwischen den Elektroden ein Büschel von feinen Nebelstreifen, die 1—2 sec lang sichtbar blieben, bis der durch die Funkenwärme erzeugte Luftstrom sie zerriß. Daß der Nebelstreifen nicht einfach war, wie bei der Kießling'schen Gewitterbeobachtung, erklärt sich leicht daraus, daß auch der Funke nicht einfach war, sondern neben dem glänzenden Hauptfunken bläuliche, schwache Nebenfunken zwischen den Elektroden übergingen, wie auch durch direkte Beobachtung des Funkens im Dunkeln zu erkennen war. Für die Nebelbildung wirken sowohl Haupt- als Nebenfunken. Die Kernbildung durch den Funken ist so kräftig, daß in den Nebelstreifen sich nicht an jedem Kern ein Tropfen bilden kann, wie die Entstehung von Nebel bei weiteren Entspannungen zeigt.

Daß die den Funken umgebenden Gase auf die Kondensation einwirken, ist schon längere Zeit bekannt. Bidwell (L.-V. 39, 43) fand z. B., daß die Luft, durch die ein Funke hindurchgegangen ist, noch nach einigen Sekunden auf den Dampfstrahl wirkt. Ferner zuckte der Dampfstrahl auf, wenn ein Funke durch ihn schlug.

Einen ähnlichen Versuch wie den oben beschriebenen, haben, veranlaßt durch eine Bemerkung von W. v. Bezold, Elster und Geitel (L.-V. 54, 55) gemacht. Sie hatten im wesentlichen dieselbe Versuchsanordnung, nur war die Funkenlänge so klein, daß sie keine Einzelheiten daran erkennen konnten. Sie wollten durch ihren Versuch auch nur zeigen, daß Luft mit Wasserdampf übersättigt sein, und daß die Kondensation aus Übersättigung durch

elektrische Vorgänge ausgelöst werden könne. W. v. Bezold (L.-V. 36, 37) hatte nämlich, um einige Erscheinungen bei Gewittern, z. B. die sogenannten Gewitternasen erklären zu können, die Existenz von übersättigtem Wasserdampf auch in der freien Atmosphäre angenommen. Übrigens hatten für Laboratoriumsbedingungen schon R. v. Helmholtz (L.-V. 58, S. 512, 59, S. 11), sowie dieser und F. Richarz (L.-V. 62, Seite 164, Zeile 5 v. o., Seite 182, Zeile 10 v. u.) das Bestehen eines solchen labilen Zustandes der Übersättigung und dessen Auslösung durch elektrische Kräfte aus dem Verhalten des Dampfstrahles geschlossen.

Die von Kießling beobachtete Erscheinung tritt nur dann auf, wenn die staubfreie Luft mit Wasserdampf übersättigt ist und wird außerdem gut sichtbar nur, wenn ein günstiger Hintergrund vorhanden ist, von dem sich der Nebelstreifen deutlich abheben kann. Diese Bedingungen können in der Natur erfüllt sein, wenn durch vorübergehenden Regen der Staub niedergeschlagen ist und die so gereinigte Luft aufsteigt und sich dabei adiabatisch abkühlt. Daß die Luft an regnerischen Tagen arm an Staub ist, haben schon die Beobachtungen von Aitken (L.-V. 5, 6, 7, 8, 9) gezeigt. Und damit hängt auch die hohe Durchsichtigkeit der Luft an solchen Tagen zusammen.

6. Wirkung von radioaktiven Substanzen.

Da die von den radioaktiven Substanzen ausgehenden Strahlen die Luft zu ionisieren vermögen, so war zu erwarten, daß sie auch die Kondensation von Wasserdampf beeinflussen würden. Hierher gehörende Versuche machte zuerst C. T. R. Wilson (L.-V. 117, 121, 126, 129). Er wies durch adiabatische Ausdehnung nach, daß es die Jonen seien, an denen sich das Wasser kondensiere. Die Versuche mit dem Dampfstrahl von Lemme (L.-V. 80), Schaum (L.-V. 103, 104), J. J. Thomson (L.-V. 107, S. 128) und C. Barus*) (L.-V. 31) bestätigen die Wirkung auf die Nebelbildung.

*) Siehe auch Physical Review 1906. S. 82—110.

Wie schon Schaum (L.-V. 104) bei seinen Untersuchungen über den Dampfstrahl bemerkte, ist die Kondensationswirkung sehr schwach, viel schwächer, als man nach der entladenden Fähigkeit erwarten sollte.

Auch meine Versuche (L.-V. 104) im Nebelgefäß ergaben, daß die Verstärkung des Nebels sehr schwach, ja kaum bemerkbar war. Untersucht wurden Radiumbromid, ein Polonium enthaltender Stab und eine Platte mit Radiotellur.

Die Substanzen wurden in das Nebelgefäß gebracht und dann die Luft entspannt. Auch ließ ich das Präparat mehrere Tage im Nebelgefäß und entspannte dann, ohne besseren Erfolg. Auch wenn ich feuchte Luft eine Woche und länger in abgeschlossenen Gefäßen der Strahlung aussetzte und diese Luft in das Nebelgefäß saugte, erhielt ich keine anderen Resultate.

7. Versuche mit Ozon.

Wie man sieht, ist die bloße Anwesenheit von Jonen in einem Gase nicht genügend, um starke Kondensation des Wasserdampfes hervorzubringen, sondern es kommt dabei wesentlich auf die Art der Jonen an; denn sonst müßten z. B. die Röntgenstrahlen und die radioaktiven Substanzen kräftig auf die Nebelbildung einwirken. Stellt man die oben untersuchten Fälle zusammen, so sieht man, daß nur dann kräftiger Nebel auftritt, wenn deutliche Ozonbildung vorhanden ist. Daß Ozon bei Spitzenausströmung und Funkenentladuug auftritt, ist ja längst bekannt, das elektrische Wechselfeld wird im Ozonisator zur Ozonerzeugung praktisch verwendet (doch spielt hierbei nach Warburgs Untersuchungen (L.-V. 115) das ultraviolette Licht, das bei der stillen Entladung auftritt, eine wichtige Rolle, wenn auch vielleicht nicht die primäre, vergl. Richarz, Marburger Sitz. Ber. Nr. 7 p. 47—53, 1903, Klüpfel, Diss. Marburg 1903, S. 41, Ann. d. Physik IV. 16, 1905, S. 578 und Rosenstock, Diss. Marburg

1906). Unter den angewandten Versuchsbedingungen erzeugt die Quecksilberbogenlampe am meisten Ozon und auch die stärkste Nebelbildung. Die Quecksilberbogenlampe ozonisiert die Luft so stark, daß das ganze Zimmer mit intensivem Ozongeruch erfüllt ist, nachdem sie einige Minuten geleuchtet hat. Es ist also bei den oben beschriebenen Versuchen ein Parallelismus zwischen Ozongehalt und der Stärke der Nebelbildung festzustellen.

Um nun näheren Einblick in die Wirkungsweise des Ozons zu erhalten, machte ich Versuche mit möglichst starkem Ozongehalt.

Die Frage, ob Ozon auf die Kondensation des Wasserdampfes wirkt, ist ganz verschieden beantwortet worden. Mascart (L.-V. 91, 92) glaubte nachgewiesen zu haben, daß auch filtriertes Ozon die Nebelbildung in einem geschlossenen Gefäß sehr begünstige, während R. v. Helmholtz (L.-V. 59), Kießling (s. L.-V. 59, S. 5), R. v. Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62) eine solche Wirkung verneinten. Die beiden letzteren, sowie Uhrig (L.-V. 111, 112) und Gunckell (L.-V. 57) wiesen durch genauere Versuche nach, daß gestandenes Ozon und „künstlich gealtertes" Ozon auf den Dampfstrahl nicht einwirkte, wohl aber frisch bereitetes, sowie zerfallendes Ozon.

Meine Versuchsanordnung war folgende (Fig. 6): Der Sauerstoff wurde einer Bombe B mit einem Druckreduzierventil R entnommen. Der Sauerstoffstrom konnte zwei Wege einschlagen. Der eine führte durch das Filter F direkt in das Nebelgefäß A. Der andere ging durch die Waschflasche S, die mit Kalilauge gefüllt war, dann zum Trocknen durch das U-rohr T_1 mit Chlorcalcium, das zweite U-rohr T_2 mit Phosphorpentoxyd*), durch den Ozonisator O

*) In dem käuflichen Phosphorpentoxyd pflegt immer etwas Phosphorsesquioxyd $P_4 O_6$ enthalten zu sein, das nach R. Schenck und F. Mihr (Ber. d. deutsch. Chem.-Ges. 1906) starke, entladende Wirkung auf ein Elektroskop besitzt. Der auf die oben angegebene Art getrocknete Sauerstoff zeigte indes keine verstärkte Kondensation im Nebelgefäß. Ob $P_4 O_6$ in größerer Menge vermehrte Nebelbildung zeigt, wäre noch zu untersuchen.

in das Nebelgefäß A. Die Waschflasche S diente dazu, die Geschwindigkeit des Sauerstoffstromes schätzen zu können vermittelst der Zahl der durchtretenden Gasblasen. Über dem Chlorcalcium bezw. dem Phosphorpentoxyd befanden sich Pfropfen aus Glaswolle, um ein Mitreißen von Staub zu verhindern. An allen Teilen, die mit Ozon in Verbindung kamen, durften natürlich keine Gummischlauchverbindungen angebracht werden. Deswegen waren alle Verbindungen von dem Hahn H_5 bis zum Nebelgefäß A aus Glas; die Röhrenstücke waren aneinander geschmolzen oder, wo dies nicht angängig war, waren sie durch Paraffin gedichtet. Die zusammenzufügenden Röhren wurden so gewählt, daß sie eben übereinander geschoben werden konnten, diese Stelle wurde erhitzt und Paraffin dazwischen fließen gelassen. Nach dem Erkalten war so ein vorzüglicher, luftdichter Schluß vorhanden. Der Ozonisator wurde in ein Standglas mit Kochsalzlösung gestellt und innen auch damit gefüllt. Die beiden Belegungen wurden mit den Polen eines Induktoriums verbunden, das mit einem Wehneltunterbrecher betrieben wurde. Das Nebelgefäß hatte die in Fig. 6 gezeichnete Stellung, sodaß der als Verschluß dienende Gummistopfen mit einer etwa 10 cm hohen Wasserschicht bedeckt war und also nicht mit Ozon in Berührung kommen konnte. Die Entspannungsvorrichtung war dieselbe wie in Fig. 2, nur mußte das aus V abgesaugte ozonhaltige Gas erst durch Natriumbisulfit perlen, um das Ozon vollständig zu zerstören. Das Rohr E mit dem Glashahn H_8 diente endlich dazu, das Wasser W in A erneuern zu können.

Das Nebelgefäß wurde zunächst in der bekannten Weise staubfrei gemacht. Die abgesaugte Luft wurde immer durch Sauerstoff ersetzt und dies so oft wiederholt, bis alle Luft aus dem Nebelgefäß und den Zuleitungen, einschließlich Trockenröhren und Ozonisator, durch Sauerstoff verdrängt war. Schließlich wurde noch einmal entspannt und dann ozonisierter Sauerstoff eingeleitet. Sowie

das erste Ozon in das Nebelgefäß eintrat, bildeten sich dichte Wolken an der Ausströmungsöffnung. Dieser Nebel besteht aus kleinen, verschieden großen Tropfen, denn er ist nicht homogen. Läßt man nur wenig Ozon eintreten, so verteilt sich der Nebel im ganzen Gefäß und sieht dann, wie man bei kräftiger Beleuchtung erkennen kann, schön blau aus. Er gleicht genau dem oben beschriebenen blauen Nebel, der bei der Wirkung des ultravioletten Lichtes und des Wechselfeldes schon ohne adiabatische Dehnung entsteht. Läßt man mehr Ozon einströmen, so wird die blaue Farbe immer weißlicher und schließlich weiß.

Nach der ersten Expansion ist der Nebel außerordentlich dicht, viel kräftiger als in irgend einem der vorhergehenden Fälle. Die Dichtigkeit des Nebels ist so groß, daß Gasglühlicht, das man durch ihn ansieht, sehr beträchtlich geschwächt ist. Dieser erste Nebel ist nicht homogen. Erst nach mehreren Entspannungen, bei einer Versuchsreihe waren es zehn, zeigen sich deutliche Beugungsfarben. Wenn sich der farbengebende Nebel gesetzt hat, bleibt, wie auch in den oben erwähnten früheren Fällen der blaue Nebel übrig.

Bei den Versuchen mit Ozon trat eine Erscheinung auf, über die ich zuerst nicht ins klare kommen konnte. Nach einer Reihe von Entspannungen trat immer noch dichter Nebel auf, ohne daß seine Dichtigkeit mit der Zeit abnehmen wollte, ja hin und wieder trat sogar eine Verstärkung der Nebeldichte auf. Später fand ich, daß die Zeit zwischen zwei Entspannungen einen Einfluß hat, daß also andauernd neue Kerne entstehen und ferner, daß die starke Belichtung durch Bogenlicht einen begünstigenden Einfluß habe. Schon nach einigen Minuten war eine sehr deutliche Verstärkung wahrnehmbar. Es ist schon früher erwähnt worden, daß ohne die Anwesenheit von Ozon dies nicht der Fall war.

Wie lange sich die Kondensationskerne in ozonisiertem Sauerstoff halten, ersah ich aus einem Versuch. Ich ent-

spannte im Nebelgefäß auf etwa $^1/_2$ Atmosphäre Druck und ließ ozonisierten Sauerstoff nachströmen, bis wieder Atmosphärendruck erreicht war. Dann wartete ich etwa 20 Stunden. Ich konnte dann den permanenten blauen Nebel noch deutlich wahrnehmen und dementsprechend ergab sich auch bei einer Entspannung dichter, vorübergehender Nebel.

Bei diesen Versuchen handelte es sich um frisch bereitetes Ozon, bei dem auch Uhrig und Gunckell Kondensationswirkung auf den Dampfstrahl nachgewiesen hatten.

Gestandenes, trockenes Ozon hat dagegen keine Wirkung auf den Dampfstrahl. Um diese Versuche mit der zwar weniger einfachen, aber empfindlicheren Methode der adiabatischen Expansion nachzuprüfen, schaltete ich zwischen Ozonisator und Nebelgefäß eine etwa 6 Liter enthaltende Kugelflasche. Sie war verschlossen mit einem zweifach durchbohrten Gummistopfen, der innen mit einer zwei Centimeter dicken, aufgeschmolzenen Paraffinschicht gegen die Einwirkung des Ozons geschützt war.*) Durch die Bohrungen führten zwei Glasröhren mit Hähnen. Dieses Gefäß füllte ich zuerst mit trockenem Sauerstoff, um die Luft daraus zu verdrängen, dann ersetzte ich den Sauerstoff durch ozonisierten Sauerstoff. Ich schloß die Hähne und überließ das Ozon etwa 14 Tage lang sich selbst. Nach Verlauf dieser Zeit trieb ich das Ozon durch trockenen Sauerstoff in das Nebelgefäß. Jetzt zeigte sich bei Exhaustion noch ziemlich kräftige Nebelbildung. Auch der blaue Nebel trat wieder auf. Der bei der ersten Entspannung sich bildende Nebel war nicht homogen. Man sieht also, daß selbst durch so langes, ruhiges Stehen das Ozon seine nebelbildende Fähigkeit noch nicht eingebüßt hat, sei es, daß diese direkt oder indirekt ist.

Nach den Versuchen von Uhrig u. Gunckell ist es nun nicht einmal nötig, das Ozon längere Zeit stehen zu lassen,

*) Wie aber inzwischen Herr Dr. Karl Stuchtey im hiesigen Institut gefunden hat, wird Paraffin im Gegensatz zur allgemeinen Annahme (vergl. Travers: Experimentelle Untersuchung von Gasen, deutsch von Estreicher, Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1905, pag. 53) von Ozon angegriffen.

um es seiner Kondensationsfähigkeit gegen den Dampfstrahl und seiner elektrischen Leitfähigkeit zu berauben. Es genügt vielmehr schon, es durch ein etwa 50 cm langes, enges, mit dichten Glaswollepfropfen gefülltes Glasrohr hindurchstreichen zu lassen, d. h. „es künstlich zu altern".

Dementsprechend schaltete ich zwischen Ozonisator und Nebelgefäß ein etwa 60 cm langes Glasrohr, das dicht mit Glaswolle gefüllt war (Glaswolle ist hier zu wählen, um etwaige Oxydationen zu vermeiden). Im Nebelgefäß wurde etwa 30 cm Druckerniedrigung hervorgebracht, und dann ozonisierter Sauerstoff in sehr langsamem Strome eingeleitet, bis Atmosphärendruck wieder erreicht war.

Schon ohne Expansion war ein dichter, blauer Nebel zu sehen, und bei der ersten Entspannung wurde ein sehr kräftiger, nicht homogener Nebel erhalten.

Da ich anfänglich die Filtration durch die Glaswolle für noch nicht genügend hielt, ersetzte ich das Glaswollerohr durch ein bedeutend größeres von 3 m Länge, das ebenfalls dicht mit Glaswolle gestopft war. Doch auch jetzt war die Nebelbildung noch sehr kräftig, wenn sie auch etwas geringer war als vorher. Es zeigt sich also, daß gestandenes und künstlich gealtertes Ozon im Nebelgefäß wirksam ist, während es den Dampfstrahl nicht beeinflußt, was bei dessen geringerer Empfindlichkeit kein Widerspruch ist.

Da nach J. J. Thomson und Rutherford (L.-V. 107, S. 12) leitende Gase ihre Leitfähigkeit verlieren, wenn sie durch Glaswolle filtriert werden, so können auch hier keine im Ozonisator erzeugte Jonen mehr vorhanden sein. Gunckell und Uhrig zeigten in der Tat, daß die Leitfähigkeit des so behandelten Ozons verschwindend gering war. Wenn man also in den oben beschriebenen Fällen die Nebelbildung auf Jonen zurückführen will, so können diese Jonen nur im Nebelgefäß selbst entstanden sein.

Um diesen Schluß noch weiter zu kräftigen, wandte ich noch eine weitere Methode an, die Jonen aus dem Ozon

zu entfernen. Leitet man ein ionisiertes Gas durch ein genügend starkes elektrisches Feld, so verliert das Gas ebenfalls seine Leitfähigkeit. (Siehe z. B. L.-V. 107, S. 12.)

Dies benutzte ich nun, um das Ozon von seinen Jonen zu befreien. Eine hierzu geeignete Form des elektrischen Feldes ist der sogenannte Zylinderkondensator. Er besteht aus einem Metallzylinder und einer konzentrischen Metallachse; beide werden auf ein verschiedenes Potential gebracht. Das zwischen Achse und Zylinder herrschende elektrische Feld ist fast homogen; längs der Achse fließt der Luftstrom, aus dem die Jonen herausgefangen werden sollen.

Ich benutzte eine Form des Kondensators wie sie z. B. Barus (L.-V. 34) angewandt hat. (Figur 7) (siehe Tafel am Schluß der Arbeit.) Der Kondensator wurde aus Glas hergestellt, und außen mit Stanniol belegt. Der Stab J bestand aus einem 2 mm dicken Stahlstab, der vergoldet war. Die Vergoldung hatte den Zweck, eine Oxydation des Metalles durch das Ozon zu verhüten. J wurde von A durch Gummistopfen K und durch Paraffin P gut isoliert; das Paraffin war auf K aufgeschmolzen, um die Gummistopfen gegen das Ozon zu schützen. Durch die Röhren a und b wurde der Kondensator mit dem Ozonisator bezw. dem Nebelgefäß verbunden und zwar wieder durch Paraffindichtungen. Die äußere Belegung A des Kondensators wurde zur Erde abgeleitet, die innere J auf ein hohes Potential gebracht. Die hohe Spannung wurde durch eine Wimshurst-Influenzmaschine erzeugt. Um möglichst konstante Spannung zu haben, trieb ich die Maschine durch einen Elektromotor. Der eine Pol wurde mit einer Batterie Leidener Flaschen und der inneren Belegung des Kondensators verbunden, der andere zur Erde abgeleitet. Die Spannung konnte an einem Braunschen Elektrometer abgeleitet werden, das bis 10 000 Volt zeigte. Bei den Versuchen war die Spannung noch höher, schätzungsweise 15 000 Volt. Der Abstand der beiden Belege war ungefähr 1 cm, die Länge des durchströmten Stückeswar 35 cm.

Ließ ich den Ozonstrom durch den Kondensator in das Nebelgefäß strömen, so zeigte sich immer noch sehr kräftige Nebelbildung.

Um meiner Sache noch sicherer zu sein, konstruierte ich noch zwei solcher Kondensatoren mit dem Unterschied, daß der vergoldete Draht durch ein dünnes Glasrohr ersetzt wurde, das im Innern einen Kupferdraht trug. Diese drei Kondensatoren schaltete ich hintereinander und verband ihre inneren, sowie die äußeren Belege. Die Spannung war dieselbe, also 15 000 Volt. Das Ozon mußte jetzt 120 cm durch das starke elektrische Feld strömen. Wenn jetzt noch Kondensation auftreten sollte, so konnten es sicher nicht mehr die Jonen aus dem Ozonisator sein, die sie hervorbrachten.

In der Tat zeigte sich auch hier wieder kräftige Nebelbildung, wenn auch der blaue Nebel nicht mehr so stark war wie vorher. Da bei diesen hohen Potentialen leicht Spitzenausströmung auftritt, so könnte dies vielleicht die Ursache sein. Diese Vermutung trifft jedoch nicht zu. Leitete ich nämlich statt des ozonisierten Sauerstoffs einfach Sauerstoff durch den Kondensator, bei derselben Potentialdifferenz, so trat keine Verstärkung der Nebelbildung ein. Also mußte das Ozon das Wirksame sein.

Nach all diesen Versuchen können es also nicht die in dem Ozonisator entstandenen Jonen sein, die die Kondensation hervorrufen. Eine Erklärungsmöglichkeit gibt vielleicht folgendes.

Der Bombensauerstoff ist nicht ganz rein, er enthält vor allem einige Prozent Stickstoff, da er aus der atmosphärischen Luft durch Befreiung von Stickstoff hergestellt wird. Das aktive Agens könnte also z. B. irgend ein Stickoxyd sein, das sich im trocknen Sauerstoff im Ozonisator oder auch im feuchten, ozonreichen Sauerstoff im Nebelgefäß bildet. Entsteht z. B. die gasförmige Verbindung im Ozonisator, so wird sie natürlich durch ein Filter nicht zurückgehalten und auch nicht von einem elektrischen Felde beseitigt werden können. Die andere Vermutung ist die, daß das Agens erst im Nebelgefäß selbst

entsteht. Diese zweite Ansicht ist die wahrscheinlichere. Die erste läßt sich ausschließen auf folgende Art und Weise.

Verwendet man in dem Ozonisator vollkommen reinen, trockenen Sauerstoff, so entsteht höchstens Ozon. Die Jonen können dann durch Filtration oder durch ein elektrisches Feld beseitigt werden. Zeigt das Ozon sich dann noch wirksam, so wirkt es entweder selbst nebelerregend, oder das Agens entsteht erst im Nebelgefäß.

Um diese Frage zu entscheiden, machte ich Versuche mit reinem Sauerstoff. Der Sauerstoff wurde aus Kaliumbichromat und Schwefelsäure gewonnen und in einem Gasometer über Wasser*) aufgefangen; er ging dann wieder durch Kalilauge, die beiden Trockenröhren, das große Glaswollenfilter in das Nebelgefäß. Der Sauerstoff im Nebelgefäß wurde wie vorher aus der Bombe entnommen. Der reine Sauerstoff wurde solange durch den Trockenapparat und den Ozonisator geleitet, bis anzunehmen war, daß er im Ozonisator ganz rein war.

Dann wurde der Ozonisator in Tätigkeit gesetzt. War Ozon in das Nebelgefäß gelangt, so trat auch hier der blaue Nebel auf und bei der Entspannung, wie alsdann zu vermuten, sehr dichter Nebel. Also ist es sehr wahrscheinlich gemacht, daß das wirksame Agens, sofern es nicht das Ozon ist, erst im Nebelgefäß entsteht; denn sonst würde man erwarten können, daß die Nebeldichte viel stärker abgenommen habe, da der Stickstoffgehalt des verwandten Sauerstoffes sehr viel geringer war, als der des Bombensauerstoffes.

Die Entscheidung der Frage, ob Ozon oder etwas anderes die Nebelbildung verursacht, kann aus den angestellten Versuchen noch nicht getroffen werden. Die entscheidenden Versuche müßten mit vollkommen reinem Sauerstoff statt des Bombensauerstoffs angestellt werden.

*) Dadurch kann aber wieder eine geringe Menge von Stickstoff dem Sauerstoff beigemengt worden sein, s. z. B. Carius Ber. d. Deutsch. Chem. Ges. 6. 1873. S. 806.

Aus Zeitmangel konnten diese Versuche nicht unternommen werden, doch ist jetzt Herr E. Pringal damit beschäftigt, sie zu machen.

Wahrscheinlich ist es, daß Ozon selbst nicht auf die Kondensation einwirkt. Dafür sprechen die Versuche von R. von Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62), Kießling (s. L.-V. 59, S. 5), Uhrig (L.-V. 111, 112) und Gunckell (L.-V. 57), die sämtlich reinen Sauerstoff verwandten. R. von Helmholtz und F. Richarz brachten das Glasrohr, dem der reine, trockene, ozonisierte Sauerstoff entströmte, dicht an den Dampfstrahl, der nicht reagierte; gaben sie dem Ozon aber Gelegenheit, sich vorher mit Luft zu mischen, so reagierte der Dampfstrahl. Dies macht es auch ihnen selbst wahrscheinlich, daß es irgend ein Oxydationsprodukt ist, das die Kondensationswirkung hervorbringt.

Wenn das wirksame Agens sich im Nebelgefäß bildet, so wird dazu Zeit erforderlich sein. Den Einfluß der Zeit konnte ich leicht zeigen.

Das Gas im Nebelgefäß wurde oft hintereinander entspannt und zeigte schließlich bei genügender Exhaustion nur noch die normale Nebelbildung, wie auf Seite 17 beschrieben ist. Nachdem also das Gas kernfrei war, überließ ich es 15 Min. ruhig sich selbst im verdunkelten Zimmer. Nach einer Entspannung zeigte sich dann sehr dichter Nebel. Also mußten sich während dieser Zeit eine große Anzahl Kerne neu gebildet haben. Nachdem das Nebelgefäß wieder kernfrei gemacht war, konnte ich dieselbe Erscheinung noch mehrfach wiederholen.

Starke Belichtung begünstigt diese Kernbildung, wie ich durch folgende Versuche zeigen konnte. Ich machte zuerst das Nebelgefäß kernfrei, wartete 2 Min. im verdunkelten Zimmer und entspannte; es zeigte sich ein schwacher Nebel. Ich machte das Nebelgefäß wieder kernfrei und belichtete 1 Min. lang mit Bogenlicht und entspannte dann; der Nebel war viel stärker als vorher.

Daraus erkennt man deutlich den begünstigenden Einfluß des Lichtes.

Wir haben also gesehen, daß durch die Wirkung des Ozons im Nebelgefäß ein Agens entsteht, das die Kondensation hervorbringt. Was ist nun dies Agens? Einen Beitrag zur Lösung dieser Frage mögen die folgenden Untersuchungen geben.

8. Untersuchung des blauen Nebels.

a. Seine Entstehung.

Wie schon auseinandergesetzt, bildet jedes Jon ein Wassertröpfchen um sich, dessen Radius $r = 1 : 3{,}2 \cdot 10^7$ ist. Alle sind natürlich elektrisch geladen, und die ungleichnamigen ziehen sich infolgedessen gegenseitig an (s. die Bemerkung von F. Richarz, L.-V. 77).

Im einfachsten Fall werden ein positives und ein negatives Jon sich nähern und schließlich miteinander verschmelzen können. Es werden dann weiterhin auch Vereinigungen von einer größeren Anzahl zustande kommen. Der Tropfenradius wird eine obere Grenze haben, die von der Stärke der Jonisation abhängen wird; denn je mehr Jonentröpfchen vorhanden sind, desto größere Komplexe von ihnen werden sich dann bilden können. Diese so entstandenen Tropfen sind elektrisch neutral und werden infolgedessen leichter verdampfen. Wir werden also in dem sich selbst überlassenen Dampf eine große Anzahl feiner Wassertropfen bekommen, deren meiste kleiner als jene obere Grenze sind, weil sie nach der gegenseitigen Neutralisirung wieder verdampfen.

Sollen dagegen weiterhin diese Tropfen durch Übersättigung bei einer Entspannung wachsen, so muß diese sehr groß sein, wahrscheinlich größer als bei Jonentröpfchen; denn ihnen fehlt die elektrische Ladung, die die Dampfspannung herabsetzt, und dies wird nicht aufgehoben durch den größeren Tropfenradius.

Solche kleinen Tropfen, die ungeladen sind und etwa 8fache Übersättigung zum Wachstum erfordern, hat C. T. R. Wilson (L.-V. 116) tatsächlich gefunden. Die Dichte des Nebels nimmt mit wachsender Entspannung beträchtlich zu, und der Tropfenradius ist größer als der eines Jonentröpfchens. (Siehe L.-V. 107. S. 151.) Auch Barus (L.-V. 31) hat kürzlich diese Beobachtung bestätigt.

Wenn die erste Jonisation sehr stark ist, so kann die Maximalgröße der durch Vereinigung von Jonentröpfchen entstehenden neutralen Tropfen größer werden. Andererseits werden nicht alle Jonen Gelegenheit haben, sich mit einer Wasserhülle zu umgeben, sondern sie werden sich, wenn verschiedene Gase vorhanden sind, zu irgend welchen chemischen Verbindungen vereinigen. Diese können sich dann in den Wassertröpfchen lösen und so die Dampfspannung vermindern. Bei einer bestimmten Tropfengröße wird Gleichgewicht herrschen. Diese Tropfen werden im allgemeinen dem Auge noch unsichtbar sein. Aber unter günstigen Bedingungen können sie auch so groß sein, daß sie im Bereich der Sichtbarkeit liegen. Wenn die Tropfengröße von der Größe der Lichtwellen des blauen Lichtes ist, so werden wir einen blau erscheinenden feinen Nebel sehen, wie er weiter oben beschrieben ist. Begünstigt wird dieser Vorgang, wenn sich chemische Verbindungen leicht bilden können. Dieser Fall wird z. B. leicht eintreten, wenn Sauerstoff ionisiert wird. Haben wir freie Sauerstoffionen, so wird sich ein Teil von ihnen zu Ozon vereinigen, der andere kann chemische Verbindungen eingehen. Da sich auch Ozon etwas in Wasser löst, so genügt dies vielleicht schon zur Erklärung des blauen Nebels.

Das Auftreten des blauen Nebels ist in andern Gasen als Sauerstoff, Luft oder sauerstoffhaltigen Gasen und für Wasserdampf*) nicht nachgewiesen. Nach dem Vorhergehenden kann man in Betracht ziehen, ob die Bildung

*) In reinem Wasserdampf aber, in Abwesenheit von andern Gasen, tritt der blaue Nebel nicht auf (L.-V. 117, S. 422).

dieser Tröpfchen und Ozonisierung miteinander verbunden ist.

Daß der Sauerstoff bei der Bildung des blauen Nebels eine wesentliche Rolle spielt, geht daraus hervor, daß er z. B. in reinem Wasserstoff nicht entsteht, wie C. T. R. Wilson (L.-V. 117) und Vincent (L.-V. 114) gezeigt haben.

Ebenso bilden sich bei Spitzenentladung in Wasserstoff keine Kerne (L.-V. 117), die bei geringen Expansionen wachsen können.

Diese kleinen Tropfen werden zu ihrem Wachstum Zeit brauchen. Im Einklang hiermit steht folgende Erscheinung, die ich bei der Nebelbildung durch Wechselfeldwirkung beobachtete (siehe Seite 21). Ich ließ das Wechselfeld einige Zeit wirken und entspannte dann sofort; die Nebelbildung war ziemlich schwach. Wartete ich jedoch nach dem Abstellen des Wechselfeldes wenige Sekunden, so war der Nebel bedeutend stärker; nach etwa 30 Sekunden war das Maximum der Wirkung erreicht, und nachher nahm sie ganz allmählich ab. Eine ganz entsprechende Erscheinung hat Barus (L.-V. 31, S. 448—53, Physical Review 1906. S. 82—110) für die Jonisation durch Röntgenstrahlen gefunden. Es bilden sich nämlich noch nach Aufhören der Strahlung Kondensationskerne.

Von den elektrischen Eigenschaften der Tröpfchen wird sich folgendes aussagen lassen. Ein großer Teil wird ungeladen sein, ein anderer positiv oder negativ. Die Zahl der geladenen Tropfen wird nach dem Abstellen des Jonisators rasch abnehmen. Dies sind alles Erscheinungen, wie sie Vincent (L.-V. 114) tatsächlich gefunden hat. C. T. R. Wilson (L.-V. 117, 121) und Lenard (L.-V. 85) konnten keine Ladung der Tröpfchen konstatieren. C. T. R. Wilsons Methode war wahrscheinlich zu ungenau und Lenards Resultat (L.-V. 85, S. 318) beruht auf einem falschen Schluß. Er bestrahlt durch ein Quarzfenster in einem abgeschlossenen Gefäß staubfreie Luft mit

ultraviolettem Licht. Der bei einer Entspannung auftretende Nebel fällt auf eine isolierte mit einem Elektrometer verbundene Metallplatte. Das Elektrometer zeigte keinen Ausschlag. Daraus schließt er, daß der Nebel nicht geladen sei. Da im Volumen gleichviel positive und negative Jonen erzeugt werden und von diesen Jonen ein Teil sich wieder vereinigt, und der andere Teil, natürlich auch aus gleichviel positiven und negativen Jonen bestehend, zur Tröpfchenbildung verwandt wird, so kann der Nebel als ganzes genommen, da auch durch das Wachsen der Tropfen an einer eventuellen Ladung nichts geändert wird, keine elektrische Ladung besitzen, also auch keine durch das Elektrometer angezeigt werden.

Schließlich ist noch zu erklären, wie durch ionenfreies Ozon der blaue Nebel entstehen kann. Man könnte annehmen, Ozon in seinem fertigen Zustande oxydiere z. B. den Stickstoff, wovon allerdings bis jetzt nichts bekannt ist, (siehe Graham-Otto-Michaelis, Anorg. Chemie, I 1878, S. 76, Zeile 8 v. u.; II 1881, S. 153; IV$_2$ 1889, S. 1442, Zeile 7 v. o.; O. Dammer, Handbuch der Chemie I, S. 406: Carius, Ann. Chem. 174. 1874, S. 11 ff, S. 33 ff; Ber. d. Deutsch. Chem. Ges. 5. 1872, S. 520; 6. 1873, S. 806) oder die Jonen rühren her von der spontanen Desozonisation des Ozons; wenn die dabei entstehende einatomige Form des Sauerstoffs, wenn auch elektrisch neutral (L.-V. 102, S. 92), teilweise auch nur kurze Zeit ihre chemische Aktivität behält, so vermag diese dann allerdings z. B. den Stickstoff zu oxydieren; doch findet Warburg (Ann. d. Physik 13. 1904, S. 470; Ber. d. Ak. d. Wiss. Berlin 1903, S. 1012), daß auch das bei Spitzenentladung in stickstoffhaltigem Bombensauerstoff entstehende Ozon den Stickstoff nicht oxydiert. Dagegen behauptete Meissner (L.-V. 93, S. 132), daß frisch bereitetes Ozon beim Zusammentreffen mit Stickstoff oder Luft, diesen zu Salpetersäure oxydiere.

Zwischen den Beobachtungen von Carius und

Meissner besteht ein Widerspruch, der vorläufig wohl nicht zu lösen ist.

Carius (Ann. Chem. 174. 1874, S. 12) stellte Ozon elektrolytisch her und ließ es gemischt mit Luft durch Wasser perlen und dann das Gemisch über dem Wasser einige Tage stehen und wiederholte dies Verfahren mehrere Mal; dann zeigte das Wasser die Ozonreaktion, aber keine Spur von freier Säure, Salpetersäure.

Ozon (l c, S. 15), das durch dunkle elektrische Entladungen aus Sauerstoff hergestellt war, wurde ebenfalls durch Wasser perlen lassen. In diesem Falle war Salpetersäure nachzuweisen, ob nun das Ozon mit Luft vermischt wurde oder nicht. Die Salpetersäure konnte also nicht in der Oxydation des Luftstickstoffes ihren Ursprung gehabt haben. Sie konnte nur so entstanden sein, daß in dem etwas stickstoffhaltigen Sauerstoff (s. S. 41, Anm.) unter dem Einfluß der elektrischen Entladung Untersalpetersäure sich gebildet hatte, die dann weiterhin durch das Ozon zu Salpetersäure oxydiert worden war.

Meissner dagegen (L.-V. 93, S. 131) leitete den auf chemischem Wege entwickelten, getrockneten Sauerstoff durch einen Ozonisator und durch zwei Wasservorlagen. In der zweiten war dem Ozon Gelegenheit gegeben, sich mit Luft zu mischen. In der ersten Vorlage konnte er keine Salpetersäure nachweisen, dagegen sehr leicht in der zweiten. Also konnte die Bildung der Salpetersäure erst in der zweiten Vorlage unter Oxydierung des Luftstickstoffes entstanden sein und nicht auf dem oben beschriebenen Wege.

Barus (L.-V. 31, S. 448—53) gibt eine andere Theorie der Kernbildung. Er nimmt an, es befinden sich dauernd eine große Anzahl kleiner Wassertröpfchen in feuchter Luft, eine Art kolloidale Lösung. Diese Tropfen können bei sehr starker Expansion > 27 cm als Kondensationskerne dienen. Trifft nun eine Strahlung auf das Gas, sei sie korpuscular oder undulatorisch, so tritt infolge von Reflexionen,

Beugungen u. s. w. ein Zustand ein, in dem man annehmen kann, daß jeder Punkt des Mediums nach allen Seiten Strahlen aussende. Infolge des Elektronenstoßes oder des Wellendruckes wird dann, wie in einem idealen „Lesage-Medium“ (vergl. z. B. Isenkrahe, Rätsel der Schwerkraft, Vieweg, Braunschweig, 1879, p. 66) eine Aggregation der Tröpfchen stattfinden. Diese Kerne werden nach Aufhören der Strahlung sehr bald wieder auseinanderfallen, er nennt sie „flüchtige Kerne“ (fleeting nuclei). Diese identifiziert er mit den Jonen. Kondensation findet an ihnen statt bei Entspannungen zwischen 21 cm und 27 cm. Wird die Strahlung kräftiger, so wird auch der Druck auf die Aggregate stärker, sodaß ein Zusammenschluß zu wirklichen Tropfen stattfinden kann, den „persistent nuclei“. An diesen Tropfen kann bei geringen Entspannungen Kondensation eintreten.

Diese Theorie erscheint sehr gekünstelt und enthält jedenfalls sehr strittige Voraussetzungen.

b. Zusammensetzung des blauen Nebels.

Die Tröpfchen des blauen Nebels können nicht allein aus reinem Wasser bestehen, da sie solange, ohne zu verdunsten, bestehen können und nach C. T. R. Wilson (L.-V. 117) sogar in ungesättigtem Wasserdampf entstehen können. C. T. R. Wilson vermutete als gelöste Substanz das Wasserstoffsuperoxyd. Vincent (L.-V. 114) glaubte, diese Auffassung als unhaltbar nachgewiesen zu haben. Er leitete nämlich die mit dem blauen Nebel geschwängerte Luft in einen Messingkasten, der eine photographische Platte enthielt. Bei der Entwicklung zeigte sich keine Spur von Wirkung auf der Platte, während $H_2 O_2$ recht kräftig die photographische Platte schwärzt. Ozon war vorhanden, wie die Bläuung von Jodkaliumstärke bewies.

Dieser Versuch ist jedoch nicht einwandfrei; denn wie K. Schaum und W. Braun (Physik. Zeitschr. 6, S. 73—74, 1905, Marb. Sitz. Ber. Jan. 1905) nachgewiesen

haben, gibt $H_2 O_2$ Solarisation (Umkehr), kann also scheinbar unwirksam sein, und die Wirkung von O_3 auf die photographische Platte hängt von der Plattensorte ab.

Ich versuchte nun, auf eine andere Art zu kontrollieren, ob $H_2 O_2$ in den Tröpfchen vorhanden sei. Löst man etwas Titandioxyd in verdünnter Schwefelsäure und setzt eine Spur von $H_2 O_2$ zu, so tritt eine kräftige Gelbfärbung der Lösung auf. Nach W. Staedel (Ztschr. f. angew. Chemie 1902, S. 642) gestattet diese Reaktion noch die Erkennung von 1 Teil $H_2 O_2$ in 1 800 000 Teilen Wasser an der blaßgelben Färbung in dicker Flüssigkeitsschicht, beim Verhältnis 1:180000 ist die Färbung hellgelb, bei 1:18000 ist das Reagens dunkelgelb gefärbt (siehe über die Größe der Empfindlichkeit dieser Reaktion auch schon Richarz und Lonnes, Ztschr. f. physik. Chemie 20, S. 147, 1896). Die Versuchsanordnung war die folgende: Durch den Tubulus b Fig. 4 (siehe Tafel am Schluß der Arbeit) führte eine Glasröhre mit einem Wattefilter, durch den die atmosphärische Luft eintrat. Der Tubulus a war durch einen Gummistopfen verschlossen; durch seine Bohrung führte eine Glasröhre sofort in eine Waschflasche, die Titanschwefelsäure enthielt. Durch dieses System wurde mit Hilfe einer Wasserstrahlluftpumpe die Luft langsam hindurchgesaugt. Die Luftmenge wurde an einer Gasuhr gemessen. Der Luftstrom wurde durch ein mit Watte dicht gestopftes, enges Glasrohr hindurchgesaugt und dadurch so verlangsamt, daß stündlich nur 10—15 Liter Luft hindurchgingen.

Durch genügend langes Stehen wurde die Luft staubfrei. Dann wurde sie durch das Quarzfenster Q (Fig. 4) mit der Quecksilberbogenlampe bestrahlt, sodaß sich der spontane blaue Nebel kräftig entwickeln konnte. Dann wurde bei fortdauernder Strahlung die Luft hindurchgeleitet, öfter auch die Lampe aus äußeren Gründen für einige Minuten ausgeschaltet und wieder eingeschaltet u. s. w. Bei einem Versuch dauerte die Gesamtstrahlungszeit 305

Minuten, und die durchgeleitete Luft betrug 134 Liter. Das Reagens zeigte keine bemerkbare Gelbfärbung.

Um die Reaktion möglichst empfindlich zu machen, füllte ich ein Reagensglas mit Titandioxydlösung und stellte es in die Waschflasche (Fig. 8) (siehe Tafel am Schluß der Arbeit); deswegen brauchte ich nur wenige ccm Lösung, während die durchperlte Schicht doch ziemlich hoch war.

Einen entsprechenden Versuch machte ich mit Ozon. Der getrocknete Bombensauerstoff ging durch den Ozonisator und durch eine Waschflasche mit Wasser. Nach seinem Austritt aus dem Wasser zeigte sich ein Nebel, wie ihn auch schon Meissner (L.-V. 93) beobachtet hatte. Das Ozon strömt dann weiter durch eine Waschflasche mit der Titandioxydlösung. Auch in diesem Falle zeigte sich keine bemerkbare Spur von Gelbfärbung. Also ist auch hier eine Entstehung von H_2O_2 nicht anzunehmen.

Zur Kontrolle ließ ich einen Luftstrom durch eine 3%ige Wasserstoffsuperoxydlösung gehen und dann durch die Titanschwefelsäure. Hierbei zeigte sich schon bei 50 Liter hindurchgeleiteter Luft eine ganz intensive Gelbfärbung. Daß H_2O_2 flüchtig ist und sein Dampf bei Absorption durch Titanschwefelsäure die charakteristiche Gelbfärbung gibt, zeigte schon F. Richarz (L.-V. 62, S. 193).

Wie wir oben gesehen haben, bildet sich im Wechselfeld und im ultravioletten Licht der blaue Nebel, ebenso bei schwachem Ozongehalt. Ist mehr Ozon vorhanden, so wird der Nebel weißlicher und schließlich ganz weiß bei frisch bereitetem Ozon. Noch stärkere Nebelbildung erhält man, wenn man zerstörtes Ozon in feuchte Luft leitet. Daß sich Nebel bildet, wenn frisch bereitetes oder auch durch Jodkalium, Pyrogallussäure, Eiweiß usw. zerstörtes Ozon mit Wasser oder feuchter Luft zusammentrifft, hatte schon Meissner (L.-V. 93, S. 20 ff) gefunden.

Ich leitete Ozon durch eine Jodkaliumlösung in eine Kugelflasche, die etwas Wasser enthielt. Schon über dem Jodkalium zeigte sich deutlich Nebel. Sobald das Ozon

in die feuchte Luft des Nebelgefäßes eintrat, bildeten sich dicke Nebel, die sich im unteren Teil des Gefäßes ansammelten. In etwa 15—20 Min. war die Kugel mit einem außerordentlich dichten Nebel erfüllt. Dann wurde der Ozonstrom abgestellt. Der Nebel wird so dicht, daß man durch eine 20 cm dicke Schicht kaum ein Gasglühlicht wahrnehmen kann.

Wie zu erwarten war, zeigte er keine Beugungserscheinungen. Nach einiger Zeit löst sich dieser Nebel auf und verschwindet, wahrscheinlich, weil infolge der Dampfspannungsdifferenzen die größeren Tropfen die kleineren „auffressen" und dann schneller zu Boden fallen.

Auch Townsend (L.-V. 110) hat den durch Ozon entstehenden Nebel untersucht. Seine Versuche und auch seine Erklärung des Nebels stehen im Widerspruch mit den Versuchen Meissners und den oben beschriebenen. Leitet er Ozon in ein Gefäß, das etwas Wasser enthält, so bildete sich kein Nebel. Er schließt aus seinen Versuchen: „Die Ursache der Bildung des Nebels ist die Wirkung des Ozons auf ein Gas, welches aus der Lösung entweicht, durch welche es geperlt ist." Daß hierdurch der Nebel besonders deutlich hervortritt, kann natürlich nicht bestritten werden, aber vorhanden ist er auch ohne dies, wie oben (S. 36) gezeigt wurde.

Vorausgesetzt, daß ein gelöster Stoff in den Nebeltröpfchen vorhanden ist, so kann doch seine Menge im allgemeinen sehr klein sein. So rechnet Townsend (L.-V. 110) aus, daß ein Tropfen Wasser von $5 \cdot 10^{-5}$ cm Radius im Gleichgewicht ist, wenn er so viel Schwefelsäure enthält, daß das Wassergewicht sich zum Säuregewicht verhält wie 1 : 0,004.

Auch Barus (L.-V. 35, S. 90 ff) zeigte, daß sehr geringe Substanzmengen dazu gehören, einen Tropfen stabil zu machen. Schüttelte er in einem Gefäß reines Wasser, so verschwanden die zersprühten Tröpfchen durch Verdampfung sehr schnell in wenigen Minuten. Bei einer

schwachen Salzlösung jedoch hielten sie sich viele Stunden lang.

Wegen ihrer geringen Menge sind die gelösten Stoffe sehr schwer nachzuweisen. Deshalb schlug wahrscheinlich auch der folgende Versuch fehl, in dem blauen Nebel, der durch das ultraviolette Licht entsteht, Stickoxyde nachzuweisen.

Benutzt wurde die Glaskugel wie Fig. 4. Ich belichtete etwa 20 Minuten, wartete dann mehrere Stunden, bis sich der blaue Nebel gesetzt hatte, belichtete wieder u. s. w. eine Woche lang, jeden Tag zweimal, sodaß sich der Nebel in der Zwischenzeit zum größten Teil setzen konnte. In der geringen Wassermenge w waren dann keine Oxydationsprodukte des Stickstoffs nachzuweisen. Ein länger ausgedehnter Versuch würde wahrscheinlich von Erfolg gekrönt sein, denn nach den Versuchen Meißners (L.-V. 93, S. 132 ff.) entstehen Oxydationsprodukte des Stickstoffs, wenn reiner, stark ozonisierter Sauerstoff mit Stickstoff oder Luft in Gegenwart von Wasser zusammentrifft. Die wahrscheinliche Ursache, daß der blaue Nebel entsteht und so lange bestehen kann, ist also in der Bildung der Stickstoffverbindungen zu suchen, denn auch in dem Kondenswasser des Ozonnebels konnte ich kein Wasserstoffsuperoxyd nachweisen.

Als Ergänzung zu den vorher beschriebenen Versuchen prüfte ich, wie sich die fertigen Produkte, Wasserstoffsuperoxyd, Salpetersäure und salpetrige Säure zur Kondensation des Wasserdampfes verhielten.

In das Nebelgefäß wurden etwa 100 cm^3 der käuflichen 3% Wasserstoffsuperoxydlösung gegossen und dann entspannt. Es ergab sich, daß das fertige Wasserstoffsuperoxyd die Nebelbildung nicht vermehrt. Für das Dampfstrahlphänomen haben bereits R. v. Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62) und Uhrig (L.-V. 111, 112) dasselbe Resultat erhalten. Auch durch Schwefelsäure oder Platinschwarz zersetztes H_2O_2 zeigt nach Uhrig keine Wirkung

auf den Dampfstrahl; obwohl bei der Zersetzung durch Platinschwarz elektrische Leitfähigkeit auftritt (L.-V. 103). Aitken (L.-V. 9) fand, daß durch Sonnenlicht zersetztes H_2 O_2 recht kräftige Nebelbildung bei der Entspannung hervorrief und die entstandenen Kerne langen Bestand hatten. Diesen Versuch konnte ich bestätigen. Es wirkt aber nur sehr intensives Licht, wie Sonnenlicht, in diesem Sinn. Eine leichte Verschleierung der Sonne hatte keinen schwächenden Einfluß auf die Wirkung. Um ultraviolettes Licht jenseits 300—325 $\mu\mu$ handelt es sich hierbei nicht; denn die Strahlen mußten die Wände des Glasballons passieren. Mit der elektrischen Bogenlampe konnte ich keinen Nebel erhalten. Ob diese Belichtung durch Sonnenlicht auch elektrische Leitfähigkeit hervorruft, wäre noch zu untersuchen. Wegen der Lichtempfindlichkeit des H_2 O_2 siehe auch d' Arcy (Phil. Mag. (6) 3, S. 42—52. 1902).

9. Untersuchung von Sauerstoff-Stickstoff-Verbindungen.

Nach R. v. Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62) wirkt konzentrierte Salpetersäure, sowie Stickstofftetroxyd, das in Stickstoffdioxyd zerfällt, und Stickoxyd, das sich zu Stickstoffdioxyd oxydiert, auf die Nebelbildung begünstigend ein, dagegen nicht stabile salpetrige Säure. Aitken (L.-V. 9) konnte die Wirksamkeit der Zersetzung von Salpetersäure und salpetriger Säure durch das Sonnenlicht auf die Nebelbildung nachweisen. Wahrscheinlich sind es hier die braunen Dämpfe von Stickstofftetroxyd, die Veranlassung zur Nebelbildung geben.

Ich löste Natriumnitrit in Wasser; diese Lösung zeigte keine Wirkung. Führte ich Schwefelsäure zu, so entwickelten sich die rotbraunen Dämpfe. Der Nebel, der bei einer Entspannung entstand, war dichter als normal durch die spontane Jonisation der Luft, aber nicht besonders stark. Um besser die Verhältnisse überblicken zu können, entwickelte ich die braunen Dämpfe von Stickstofftetroxyd nicht im Nebelgefäß selbst, sondern gesondert

in einer Kugelflasche. Von dort konnten sie dann leicht in das Nebelgefäß gebracht werden. Zuerst wurde eine Anzahl Entspannungen vorgenommen, bis eine braune Färbung im Nebelgefäß kaum noch wahrzunehmen war. Da die Gleichgewichtsbeziehung $2\ N\ O_2 \rightleftarrows N_2\ O_4$ besteht und die Menge der einzelnen Bestandteile stark von der Temperatur abhängt, also bei den immer stattfindenden Temperaturschwankungen beständig eine chemische Umsetzung stattfindet, von welcher wir vermuten, daß sie irgendwie Kerne liefert, so war anzunehmen, daß die Nebeldichte wachsen würde, wenn den Nebelkernen Zeit bliebe, sich anzusammeln. Dies zeigte sich in der Tat. Der Nebel ist nicht homogen; es treten immer Tropfen von zweierlei Größe auf. Da verschiedene große Tropfen auch verschieden schnell fallen, so kann man die beiden Tropfenarten nacheinander beobachten. Die kleineren Tropfen zeigen etwa doppelt so große Beugungsringe wie die größeren.

Belichtet man mit der elektrischen Bogenlampe, so erkennt man, daß nicht alle Tropfen niederfallen, sondern eine kleine Anzahl in der Luft suspendiert bleibt und sogar aufsteigende Bewegung annimmt. Hat sich die Luft nach einer Entspannung einigermaßen beruhigt, so sieht man, wie die wandständigen Partien des Nebels infolge der Wärme der Wände eine aufsteigende Bewegung haben. In der Mitte muß natürlich der Luftstrom wieder herabsteigen. Dies ist stets das anfängliche Aussehen der Erscheinung; nachdem die Belichtung einige Minuten gedauert hatte, stiegen die Tropfen in der Mitte in die Höhe und fielen an den Seitenwänden herab. Möglicherweise ist vermehrte Absorption der Strahlen im Innern und dadurch bewirkte Erwärmung des Gases die Ursache.

Wird die Belichtung des Nebelgefäßes mit Bogenlicht fortgesetzt, so werden die zuerst wenigen Tröpfchen immer zahlreicher. Bei einer Entspannung ist der jetzt entstehende

Nebel außerordentlich dicht und nicht homogen. Er zeigt oft irisierende Färbungen.

Zu dieser starken Vermehrung des Nebels ist übrigens nur äußerst wenig $N_2 O_4$ notwendig. Bei einem Versuche hatte ich das Nebelgefäß mit dicken rotbraunen $N_2 O_4$ Dämpfen gefüllt. Ich nahm dann im Dunkeln eine Anzahl Entspannungen vor von etwa $^1/_3$ Atmosphäre und größer. Die abgesaugte Luft wurde natürlich jedesmal durch filtrierte Luft ersetzt. Nachdem ich dies 24 Mal wiederholt hatte, belichtete ich 5 Min. und entspannte wieder. Der entstehende Nebel war äußerst dicht. Nach 5 Exhaustionen sind die Kerne wieder beseitigt. Ich belichtete wieder 5 Minuten und fand wieder sehr dichten Nebel. Dies wiederholte ich noch oft. Nach der 65. Entspannung belichtete ich 5 Min. und fand einen Nebel, dessen Dichtigkeit kaum geringer war als bei früheren Belichtungen. Ich überließ dann das Gas etwa 20 Stunden sich selbst am Fenster, also dem Tageslicht ausgesetzt. Durch einige Expansionen wurden die Kerne beseitigt und das Gas wieder 5 Min. dem Bogenlicht ausgesetzt. Bei einer Entspannung trat sehr dichter Nebel auf, wenn auch seine Dichte geringer war als am vorhergehenden Tage. Damit wurde dieser Versuch abgebrochen. Wenn man die Entspannung zu $^1/_3$ Atmosphäre annimmt, so wären zuletzt nur noch etwa $(^2/_3)^{70}$ des ursprünglichen $N_2 O_4$ vorhanden, und diese äußerst geringe Menge genügte, um bei Belichtung noch kräftige Wirkung zu geben.

Die zur Nebelbildung notwendige Entspannung braucht übrigens nicht so groß zu sein, wie bei dem obigen Versuch; es genügen vielmehr schon ganz geringe Expansionen. Eine interessante Frage wäre auch hier, inwiefern die Nebelbildung und die gebildeten Nebel durch ein statisches elektrisches Feld beeinflußt werden.

Wir haben hier eine weitgehende Analogie mit dem Verhalten des Ozons. Hier wie dort haben wir eine spontane Kernbildung, sowie eine Vermehrung der Kern-

zahl bei starker Belichtung. Zu letzterem ist eine sehr geringe $N_2 O_4$ bezw. O_3 Menge nötig. Eine Erklärung könnte man vielleicht darin finden, daß das Ozon bei seinem Zerfall den Stickstoff oxydiert und dieses Oxydationsprodukt seinerseits wieder durch das Licht zersetzt wird.

B. Untersuchung von anderen Dämpfen und Gasen.

1. Benzol in Wasserstoff.

Bei allen bisherigen Versuchen war Sauerstoff vorhanden. Wie wir gesehen haben, spielt er bei der Nebelbildung eine große Rolle. Deshalb war es interessant, sauerstofffreie Gase und Dämpfe zu untersuchen.

Ich nahm deshalb Benzoldämpfe in Wasserstoff. Die Versuchsanordnung war dieselbe wie früher. Der Wasserstoff wurde einer Stahlbombe entnommen. Um das Gas möglichst frei vor allem von Sauerstoff zu haben, wurde es folgendem Reinigungsprozeß unterworfen. Der Wasserstoff passierte zuerst ein Druckreduzierventil, ging dann durch eine W o u l f f'sche Flasche mit Kaliumpermanganat, um etwa vorhandene organische Stoffe zu entfernen, durch eine Waschflasche mit Kalilauge, um Kohlensäure zu beseitigen, durch zwei Waschflaschen mit Pyrogallussäure zur Absorption des Sauerstoffes und zwecks Trocknung durch eine Waschflasche mit konzentrierter Schwefelsäure, durch ein U-rohr mit Chlorcalcium und durch zwei U-röhren mit Phosphorpentoxyd in das Nebelgefäß. In diesem befand sich am Boden eine Schicht reinen Benzols. Zuerst machte ich eine größere Anzahl von Entspannungen, um die im Nebelgefäß noch vorhandene Luft zu entfernen.

Es zeigte sich, daß man in Benzoldämpfen nur sehr schwer Nebel erhalten kann. Es entstehen nur sehr wenige, große Tropfen, die wegen ihrer geringen Anzahl keine Beugungsfarben zeigen. Erst bei sehr starken Entspannungen (etwa 40 cm Quecksilbersäule) zeigt sich ein etwas stärkerer Nebel, der kleine Beugungsringe erkennen läßt.

Ließ ich das elektrische Wechselfeld wie S. 19 längere Zeit, bis 11 min., einwirken, so ergab sich keine verstärkte Nebelbildung. Auch Röntgenstrahlen wirkten nicht auf die Kondensation ein. Ebensowenig Erfolg hatte eine 15 min. lange Bestrahlung mit ultraviolettem Licht der Quecksilberbogenlampe durch die Quarzlinse Q Fig. 4, (siehe Tafel am Schluß der Arbeit).

Benzol in Wasserstoff vermag sich also nicht an Jonen zu kondensieren; denn daß Jonen in Wasserstoff z. B. durch Röntgenstrahlen entstehen, ist ja nachgewiesen.

Eine dünne Nebelschicht über dem Benzol, wie sie Barus (L.-V. 35) gefunden hat, konnte ich hier nicht wahrnehmen. Die Kerne für diesen Nebel rühren also vermutlich von einer Wirkung des Sauerstoffes her.

2. Schwefelkohlenstoff in Wasserstoff.

Weitere Versuche ähnlicher Art machte ich mit reinem Schwefelkohlenstoff in einer Wasserstoffatmosphäre.

Es zeigte sich, daß die Versuche nur im Dunkeln angestellt werden dürfen, da sich im Lichte zahlreiche Kondensationskerne bilden. Das zur Beobachtung der Beugungsringe dienende, 4,5 m entfernte Gasglühlicht ist zu schwach, um erhebliche Mengen von Kernen liefern zu können. Bogenlicht wirkt sehr stark ein. Schon eine Belichtungsdauer von etwa 15 sec genügt, um soviel Kerne zu erzeugen, daß 7 Entspannungen von etwa 28 cm Quecksilber nötig sind, sie wieder zu entfernen. Die Kerne ordnen sich so an, daß die größten sich unten im Gefäß befinden und die kleineren im oberen Teile. Bei kleinen Entspannungen bildet sich deshalb auch nur im untersten Teil des Gefäßes eine dünne Nebelschicht aus, und erst bei stärkeren Expansionen wird der ganze Raum mit Nebel erfüllt. Aus diesem Grunde wurden auch die Entspannungen so groß gewählt. Die wirksamen Strahlen sind hier die sichtbaren Lichtstrahlen; denn das Bogenlicht geht zuerst durch die dicken Kondensorlinsen, durch das Kühlwasser

und durch die Wand des Nebelgefäßes, und hierbei werden die ultravioletten sowie die ultraroten Strahlen absorbiert. Entsprechende Versuche mit der Quecksilberbogenlampe zeigten dasselbe, denn eine zwischen das Quarzfenster des Nebelgefäßes Fig. 4 und die Lichtquelle geschaltete Glasscheibe, die die für Luft und Wasserdampf wirksamen Strahlen abschneidet, schwächt hier die Wirkung nur sehr wenig.

Die von Schaum (L.-V. 103) gefundene Wirkung des Schwefelkohlenstoffs auf den Dampfstrahl ist nach diesen Versuchen wahrscheinlich nicht blos eine rein thermische, sondern auch wesentlich beeinflußt durch die Zersetzung des Schwefelkohlenstoffs im Licht.

Röntgenstrahlen wirken hier kräftig auf die Nebelbildung ein. Nach einer 10 min. langen Strahlung gehörten 10 Entspannungen von ca. 28 cm dazu, sämtliche Kerne wieder zu beseitigen.

Auffallend ist, daß das elektrische Wechselfeld hier keine Wirkung ausübt, selbst nach 10 min. langer Dauer. Bemerkenswert ist, daß zwischen den mit dem Induktorium verbundenen Platten und den nächstgelegenen Kugelkalotten des Nebelgefäßes keine Entladungen übergehen, wie es bei den früheren Versuchen mit Luft und Wasser der Fall war (S. 20). Wahrscheinlich übt die dünne Wasserschicht, die das Nebelgefäß innen bedeckt, Influenz aus, und deswegen entstehen zwischen Platten und Nebelgefäß so starke Spannungen, daß dadurch die Lichtbüschel hervorgerufen werden. Bei Schwefelkohlenstoff bleibt diese Erscheinung aus, weil er ein Nichtleiter ist.

Auch hier halten sich die Kerne sehr lange, wie in den früher beschriebenen Versuchen. Das Nebelgefäß wurde 5 min. lang belichtet und dann im Dunkeln sich selbst überlassen. Nach 15 Stunden waren 5 Entspannungen nötig, um die noch vorhandenen Kerne zu beseitigen.

Der im Schwefelkohlenstoff entstehende Nebel zeigt lange nicht die prächtigen Farben des Wassernebels. Die

Beugungsringe haben nie die Größe, daß sie die gefärbten zentralen Felder zeigen (S. 62).

Der bei der ersten Entspannung auftretende Nebel ist auch hier nicht immer vollkommen homogen. Die Tröpfchen fallen auch bedeutend schneller, als die gleich großen Wassertröpfchen in Luft, da die innere Reibung in Wasserstoff geringer ist. Daß auch hier ein sichtbarer blauer Nebel auftritt, ist nicht zu erwarten; denn wie oben S. 22 auseinandergesetzt, ist ein solcher nur sichtbar, wenn die Beugungsringe eine gewisse Größe überschreiten, und diese Größe wird bei Schwefelkohlenstoff nicht erreicht.

Die Frage, ob auch hier die Jonen die Kernbildner sind, läßt sich zur Zeit noch nicht mit voller Sicherheit beantworten. Wahrscheinlich ist es ja, aber dann kann man schwer erklären, warum das elektrische Wechselfeld ganz unwirksam ist. Hierüber können erst Leitfähigkeitsuntersuchungen und etwaige Analogien bei anderen Dämpfen von ähnlicher Zusammensetzung Aufschluß geben.

IV. Versuche über die optischen Eigenschaften des Nebels.

1. Größenbestimmung der Tropfen auf optischem Wege.

Die im folgenden beschriebenen Beobachtungen sind zum Teil Nebenresultate, die sich bei den im ersten Teil untersuchten Erscheinungen darboten. Sie sind natürlich längst nicht vollständig und auch nicht systematisch untersucht.

Der nächste Zweck dieser Untersuchungen war, die Größe der in dem Nebel auftretenden Tropfen zu bestimmen. Hierbei kann man eine ganze Anzahl verschiedener Methoden anwenden. Die prinzipiell einfachste ist die direkte mikroskopische Messung. Andere Methoden, die hier in Betracht kommen können, sind eine „mechanische" und zwei optische.

Die „mechanische" beruht auf der Messung der Fallgeschwindigkeit des Nebels. Ein Körper fällt im allgemeinen in beschleunigter Bewegung. Ist aber die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen groß, so beeinflußt die Reibung der Luft merklich die Bewegung. Bei sehr kleinen Körpern, z. B. den Tropfen des Nebels, wird unter dem Einfluß der Reibung der Luft die Bewegung zu einer gleichförmigen. Für die konstante Fallgeschwindigkeit kleiner Kugeln gilt die Formel (L.-V. 79, S. 321):

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{d - \delta}{\mu} r^2.$$

v ist die Geschwindigkeit, g die Erdschwere, d die Dichte der Kugel, δ die Dichte des umgebenden Gases, μ der Reibungskoeffizient des Gases und r der Radius der Kugel.

In den meisten Fällen ist die Tropfengröße so gering, daß man die einzelnen Tropfen nicht wahrnehmen und infolgedessen auch ihre Geschwindigkeit nicht messen kann. In diesem Falle mißt man die Fallgeschwindigkeit der oberen Grenze des Nebels. Die notwendige Voraussetzung für ein richtiges Resultat hierbei ist, daß alle Tropfen gleich groß sind; mit anderen Worten, der Nebel muß homogen sein. Die Tropfengröße eines inhomogenen Nebels kann man also so nicht bestimmen. Außerdem treten häufig Luftströmungen im Gefäße störend auf. Aus diesen Gründen ist die obere Grenze des Nebels sehr häufig nicht scharf genug, um genaue Bestimmungen der Fallgeschwindigkeit zu ermöglichen. Es sind also auch die Größenberechnungen, die auf diesem Wege erhalten werden, ziemlich ungenau und häufig unmöglich. Die starken Bewegungen des Nebels, die Lemme (L.-V. 81) beobachtete, rühren vermutlich von den starken Temperaturdifferenzen her, da der heiße Dampfstrahl in das Gefäß einströmte, und von der kinetischen Energie des Dampfstrahls.

Nebenbei bemerkt, läßt sich mit Hilfe der obigen Formel der Reibungskoeffizient von Gasen messen; denn die Gleichung enthält außer μ lauter bestimmbare Größen: v, die Fallgeschwindigkeit, läßt sich messen, d, δ und g sind bekannte Größen und r kann z. B. auf optischem Wege gefunden werden. Daraus läßt sich dann μ berechnen.

Nach dieser Methode wurden umgekehrt unter Voraussetzung des bekannten Wertes von μ nur wenig Größenbestimmungen vorgenommen. Es ergaben sich im allgemeinen Werte für r, die mit den auf optischem Wege

gefundenen im Großen und Ganzen übereinstimmten; doch waren die Abweichungen ziemlich groß.

Für die Größenbestimmung auf optischem Wege kann man zwei Methoden anwenden. Das bei den Nebeltröpfchen entstehende Beugungsbild setzt sich zusammen aus dem zentralen Feld und den Beugungsringen. Bei genügend kleinen Tropfen, unter 8 μ, ist das zentrale Feld kräftig gefärbt. Wie Barus (L.-V. 34) gefunden hat, stimmt die Farbenfolge des zentralen Feldes für verschiedene Tropfengrößen mit den Farben dünner Blättchen überein. Daraus läßt sich dann eine Methode finden, die Größe dieser Tropfen zu berechnen. Bei sehr kleinen Tropfen und dicker Schicht lassen sich die „axialen Farben" wahrnehmen, d. h. die Farben, in denen die Lichtquelle selbst durch den Nebel erscheint. Diese sind nach Barus (L.-V. 35) nahezu komplementär den Farben des zentralen Feldes. Ich selbst habe sie nicht wahrgenommen, da die Dicke der Nebelschicht bei meinen Versuchen zu gering war, um sie deutlich zu zeigen.

Die Farbe der Beugungsringe ist oft sehr prächtig und hängt natürlich von der Tropfengröße ab. In homogenem Licht zeigen sich von der Lichtquelle ausgehend zuerst ein heller Kreis und weiter abwechselnd Minima und Maxima der Intensität.

Die Lage der Maxima und Minima folgt dem Gesetze (L.-V. 113, S. 207, siehe auch Kirchhoff, Optik, S. 100 und S. 94, 95; [statt m heißt es dort z]):

$$\sin \vartheta = \frac{m \cdot \lambda}{\pi \cdot R}$$

wobei λ die Wellenlänge des angewandten Lichtes ist, R der Radius der kreisförmigen Öffnung oder des kreisförmigen Scheibchen die nach dem Babinet'schen Prinzip gleichwertig sind (die Tropfen können hier als undurchsichtige oder durchscheinende Scheiben gelten), ϑ der Winkel, den der gebeugte Strahl mit dem ursprünglichen bildet, und m für jedes Intensitätsmaximum und Minimum einen bestimmten Wert hat,

Für das erste Minimum ist $\frac{m}{\pi} = 0{,}61$. Also ist

$$R = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{\sin \vartheta}.$$

Hiernach kann man also R bestimmen, wenn man $\sin \vartheta$ kennt.

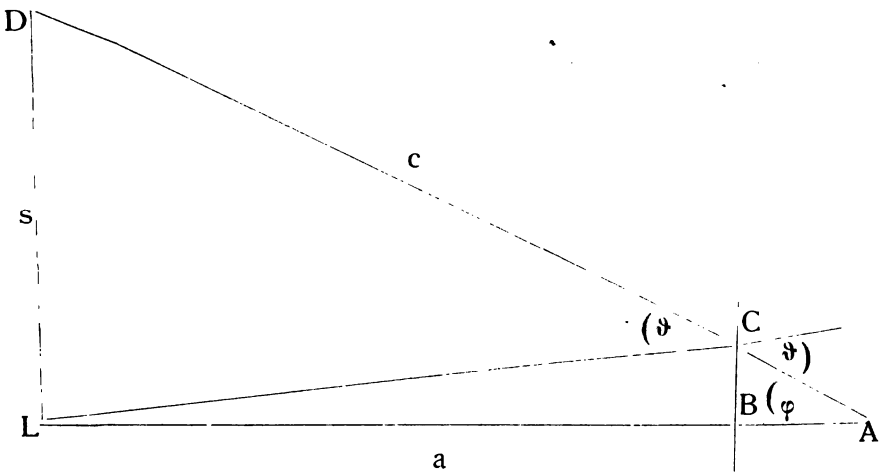


Fig. 9

Die beugenden Körper seien in der Ebene B C, das Auge befinde sich in A. L C sei ein Lichtstrahl, der um den Winkel ϑ abgelenkt werde in die Richtung C A. Das Auge projiziert dann C auf D. Liegt A sehr nahe an B, so ist der Winkel φ sehr nahe gleich ϑ, also

$$\sin \vartheta = \sin \varphi = \frac{s}{c} = \frac{s}{\sqrt{s^2 + a^2}}.$$

folglich

$$R = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{s} \cdot \sqrt{s^2 + a^2}.$$

Dieser Fall wurde verwirklicht. Die Lichtquelle war 4,5 m vom Nebelgefäß entfernt. Dicht dahinter befand sich ein Maßstab, an dem die Größe s abgelesen werden konnte. Das Auge wurde dicht an das Nebelgefäß gebracht,

dessen Durchmesser ca. 20 cm war. Nimmt man an, daß die beugenden Nebelteilchen die Mitte des Gefäßes einnehmen, so ist A B = 10 cm. Das ist gegen A L = 450 cm praktisch zu vernachlässigen.

Die Lichtquelle L bestand aus einem Auerbrenner für weißes Licht und einem Bunsenbrenner, dessen Flamme durch Bromnatrium intensiv gelb leuchtete. Das Salz wurde vermittelst eines Stückes Asbestpappe in die Flamme hineingebracht. Diese beiden Lichtquellen befanden sich dicht übereinander und etwas horizontal getrennt, sodaß durch einen lichtdichten Schieber die eine und die andere abwechselnd in Benutzung genommen werden konnte. Die Skala befand sich dicht hinter den Lichtquellen und bestand aus schwarzem Pappdeckel, auf den in je 1 cm Abstand 1 cm breite Stanniolstreifen geklebt wurden. Alle 10 cm wurde ein etwas längerer Stanniolstreifen genommen. Diese Skala war auch in dem fast dunklen Zimmer noch deutlich zu erkennen.

Die auf diese Weise gemessenen Tropfendurchmesser schwankten zwischen etwa $2{,}8 \cdot 10^{-4}$ cm und etwa $36 \cdot 10^{-4}$ cm, entsprechend $s = 120$ cm und $s = 9$ cm. Kleinere Tröpfchen kamen auch häufig vor, konnten aber auf diesem Wege nicht gemessen werden, da sich hierbei selten scharfe Beugungsringe ausbilden, aus den S. 13 angeführten Gründen. Auch praktisch gibt es für diese Methode eine Grenze; denn wenn der Winkel nahe an 90° herankommt, kann er natürlich nicht mehr beobachtet werden. Bei Natriumlicht, $\lambda = 589$ μμ, ergibt sich für das erste Minimum für

$$\vartheta = 45^\circ, \quad R = 0{,}51\ \mu$$
$$\vartheta = 60^\circ, \quad R = 0{,}42\ \mu$$
$$\vartheta = 90^\circ, \quad R = 0{,}36\ \mu,$$

vorausgesetzt, daß die Beugungsformel für diese kleinen beugenden Körper noch gilt. Größere Tropfen traten auch auf, konnten aber bei der Größe des angewandten Nebel-

gefäßes nicht gemessen werden, da ihre Anzahl zu gering war, um kräftige Beugungsringe zu liefern.

Vielleicht läßt sich auch auf folgende Beobachtung eine Methode zur Bestimmung der Tropfengröße gründen, die auch für nicht ganz homogenen Nebel anwendbar wäre, wenn nur kleinere Partien des Nebels homogen sind. Belichtet man nämlich das Nebelgefäß mit parallelem Bogenlicht und schneidet aus diesem Lichtzylinder durch einen Spalt einen Lichtstreifen heraus, wie Fig. 10 zeigt, so erscheint der Nebel häufig schon gefärbt, wenn man in der in der Figur angedeuteten Richtung A sieht (siehe Tafel am Schluß der Arbeit).

Ist der Nebel homogen, und bewegt man das auf das Nebelgefäß gerichtete Auge langsam von C nach A, so sieht man sehr kräftig die Beugungsfarben in derselben Reihenfolge wie sonst. Je weiter man von C entfernt ist, desto matter und weißlicher wird die Farbe. Sieht man etwa in der Richtung A, so erkennt man bei homogenem Nebel keine Farben mehr. Hat man dagegen sehr feinen nicht homogenen Nebel, so sieht man auch in dieser Richtung noch kräftige Farben, die aber fleckenartig angeordnet sind. Aus dem Beugungswinkel C A bei homogenem Licht könnte man dann die Tropfengröße berechnen. Auf diese Weise kann man auch erkennen, daß der über Wasser entstehende Nebel häufig schichtenförmig angeordnet ist. Entspannt man sehr langsam, so sieht man deutlich, wie die Nebelbildung von unten langsam nach oben hin fortschreitet. Es zeigen sich dann parallel der Wasserfläche farbige Streifen, die bei weiter abnehmendem Druck nach oben hin wandern. Auf diese Weise sind oft noch Farben wahrnehmbar, die man sonst nicht mehr beobachten kann.

2. Kontrolluntersuchungen an Staubplatten.

Um die Genauigkeit der gefundenen Werte zu prüfen, machte ich Kontrollversuche mit Staubplatten. Gewöhnlich braucht man zur Beobachtung von Beugungsbildern die

Sporen von Lycopodium oder, wie Kießling (L.-V. 74) empfohlen hat, die Sporen von Boletus cervini. Allein diese Körper sind ca. 30 μ groß und zeigen infolgedessen nur kleine Beugungsringe. Für diese Untersuchungen kam es darauf an, möglichst kleine, gleich große Körper zu finden. Als solche erwiesen sich Blutkörperchen, die Sporen von Bovisten und andern Pilzen, vor allem von Schimmelpilzen. Alle diese sind leicht in genügend großer Menge zu bekommen.

Die verschiedensten Schimmelpilze sind leicht zu erhalten, indem man z. B. feuchtes Brot eine Zeit lang offen stehen läßt und dann in eine bedeckte Glasschale bringt, bis sich ein Schimmelrasen gebildet hat. Über diesen streicht man mit einem Objektträger hin und bedeckt die darauf liegende Sporenschicht mit einem dünnen Deckgläschen, das man durch einen Wachsrand befestigt. Wie dicht die Sporen liegen müssen, findet man sehr bald heraus. Blickt man durch ein solches Präparat nach einer Lichtquelle, so erscheint diese von schönen, großen Beugungsringen umgeben.

Die Größe der beugenden Körper wurde auf optischem Wege ebenso bestimmt wie die Tropfengröße des Nebels. Die Lage der ersten Minima wurde auf einer 103 cm entfernten Skala durch bewegliche Zeiger markiert und dann ihr Abstand $a = 2s$ gemessen. Bei jedem Präparat wurden 5 Messungen gemacht und dann das Mittel genommen.

Ferner wurde die Größe direkt mikroskopisch gemessen. Die einzelnen Sporen wurden vermittelst Mikroskop und einem Zeichenapparat von Oberländer bei 900facher Vergrößerung genau ihrer Größe nach gezeichnet und mit Millimetermaßstab die Größe der Bilder ausgemessen. Die Vergrößerung wurde dadurch festgestellt, daß ein Objektmikrometer, 2 mm = 200 Teilstriche, ebenfalls gezeichnet und ausgemessen wurde. Für jedes Präparat machte ich

über 100 Einzelmessungen und nahm das Mittel von ihnen. Es ergab sich folgende Tabelle:

Präparat No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a. optisch gemessen in μ	2,35	3,63	6,99	4,55	4,11	3,56	7,44	6,96	13,04	7,16	3,36
b.mikroskopisch gemessen	2,27	3,56	6,93	4,35	3,92	3,51	7,55	7,55	13,23	7,31	3,39
Differenz a—b	0,08	0,07	0,06	0,20	0,19	0,05	-0,11	-0,59	-0,19	-0,15	-0,03

Wie man sieht, ist die Übereinstimmung eine sehr befriedigende. Die größeren Abweichungen in 8 und einigen anderen hier nicht aufgeführten Fällen rühren vielleicht daher, daß die Größe in den einzelnen Teilen des Präparats nicht dieselbe war, oder daß auch die Beugungsbilder nicht deutlich genug waren, um mit genügender Genauigkeit die ersten Minima festzustellen.*)

3. Ueber einige Besonderheiten der Beugungsbilder.

Zum Schluß möchte ich noch auf einige Besonderheiten des Beugungsbildes eingehen. Im allgemeinen wechseln im Beugungsbilde bei homogenem Licht Maxima und Minima regelmäßig ab. Allein hier treten oft eigenartige Anordnungen der Maxima uud Minima auf.

Aus meinen Aufzeichnungen hierüber ergibt sich, daß man etwa 4 Typen von Helligkeitsverteilung unterscheiden kann.

1. Drei oder mehr Maxima und Minima sind deutlich zu erkennen, die Intensität nimmt von innen nach außen ab.

2. Zwei Maxima sind sehr deutlich, von den übrigen ist nichts zu sehen.

*) Diese letzten Versuche machte ich in den Ferien im Elberfelder Gymnasium. Die dazu nötigen Hilfsmittel stellte mir Herr Prof. Adolph freundlichst zur Verfügung, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank ausspreche.

3. Das erste Minimum ist sehr schmal, das erste Maximum ist sehr breit und sehr hell, von den übrigen ist wenig oder gar nichts wahrzunehmen.

4. Das erste Maximum ist sehr schwach oder gar nicht vorhanden, das erste und zweite Minimum sind dementsprechend breit und verschmelzen oft zu einem sehr breiten Minimum, die übrigen Maxima sind zu lichtschwach, um gesehen zu werden.

Selbstverständlich sind diese Typen nicht scharf von einander geschieden, sondern es existieren alle möglichen Uebergänge zwischen ihnen.

Wodurch diese Typen bedingt sind, darüber wage ich vorläufig keine Vermutung auszusprechen. Ein durch kleine ganze Zahlen ausdrückbares Verhältnis zwischen Tropfengröße und Tropfenabstand kann nicht die Ursache sein, da die Entfernung zweier Tropfen dafür viel zu groß ist, es könnte sonst der Nebel nicht so durchsichtig sein. Barus (L.-V. 35, S. 65) z. B. berechnet für einen bestimmten Fall, daß die gegenseitige Entfernung der Tropfen das 87fache ihres Durchmessers ist.

Es scheint jedoch eine Beziehung zur Tropfengröße zu bestehen. Wenn z. B. das zentrale Feld gelbgrün gefärbt ist, was etwa einer Tropfengröße $r \backsim 2,6\ \mu$ entspricht, so haben wir den Typus 4. Ebenso bei einer Tropfengröße $r \backsim 3,7\ \mu$. Bei gleicher Färbung des zentralen Feldes zeigt sich auch häufig gleiche Helligkeitsverteilung in homogenem Licht.

Ferner möchte ich noch eine Erscheinung erwähnen. Hat man dichten, homogenen Nebel im Beobachtungsgefäß und läßt filtrierte Luft langsam einströmen, so erweitern sich infolge Verdunstens der Tröpfchen die Ringe, bis man sie kaum noch zu sehen vermag. Das bis dahin helle zentrale Feld wird dann dunkel und von innen heraus treten wieder neue Ringe auf, erweitern sich und verschwinden schließlich. Weiter ist dann nichts von Beu-

gungserscheinungen zu sehen. Bei so kleinen Tropfen würde man auch sonst wohl keine Beugungsringe wahrnehmen können, wenn sie an ihrem Platze blieben. Wenn die Ringe sich dagegen bewegen, so sind sie naturgemäß leichter zu erkennen.

Genaue experimentelle und theoretische Untersuchungen werden auf diese Erscheinungen erst das rechte Licht werfen können.

Nachtrag.

Während der Drucklegung meiner Dissertation erhielt ich Kenntnis von einer soeben erschienenen Arbeit K. Przibrams: Über die Kondensation von Dämpfen in ionisierter Luft. (Sitz. Ber. d. K. Ak. d. Wiss. Wien, Math. Nat. Klasse. 1906. S. 33—38.)

Er benutzt dieselbe Versuchsanordnung wie C. T. R. Wilson und auch Expansionsräume derselben Größe wie dieser; sie sind also auch zu klein, um alle bei der Nebelbildung auftretenden Erscheinungen beobachten zu können (s. S. 18). Es beruht ferner auf Irrtum, wenn er angibt, zuerst J. Campnile und di Ciommo hätten im Jahre 1903 (Phys. Z. S. 4, 648—51) andere Dämpfe als Wasserdampf in Bezug auf Kondensationsauslösung untersucht. Vielmehr haben schon R. v. Helmholtz und F. Richarz (L.-V. 62) Dampfstrahlen von Alkohol, Ameisensäure, Essigsäure und Anilindämpfen untersucht. Auch Donnans Arbeit: Über die Kondensation von Dämpfen organischer Flüssigkeiten in dunstfreier Luft (L.-V. 53) ist nicht erwähnt, ebensowenig die Arbeit von Barus (L.-V. 35), der ebenfalls teilweise dieselben Dämpfe untersucht hat wie Przibram. Auffallend ist, daß Przibram und Donnan für das Auftreten der ersten, regenartigen Kondensation verschiedene Werte für $\frac{v_2}{v_1}$ bekommen. Przibram verwendet allerdings einen äußeren Jonisator (ein Radiumprärat und Röntgenstrahlen), während Donnan die Nebelbildung in staubfreier Luft untersucht. Nach C.

T. R. Wilson ist bei Wasserdampf eine solche Differenz der Entspannungsgröße nicht vorhanden, ob er das Gas ionisiert oder nicht.

Sehr wichtig ist aber das Hauptresultat der Arbeit von Przibram, daß die Dämpfe der Alkohole sich leichter auf die positiven Jonen niederschlagen, als auf die negativen, anders als bei Wasserdampf.

Auch Przibram kommt zu dem Schluß, daß man bei der Erklärung der Kondensation nicht ausschließlich die physikalischen Eigenschaften der Gasionen zu berücksichtigen habe, wie es auch aus meinen Resultaten zu schließen ist.

Literatur-Verzeichnis.

1. Aitken: Proc. Roy. Soc. London 1880—81. S. 11, 14—18, 122—26.
2. 1892. 51. S. 408—439.
3. Proc. Roy. Soc. Edinburgh 1890. 17.
4. Trans. Roy. Soc. Edinburgh 30. 1881. S. 337.
5. 35. 1890. Part I.
6. 36. 1892. S. 313—19.
7. 37. 1893. Part I. Nr. 3.
8. 37. 1893. Part III. Nr. 28.
9. 39. 1896/97. Part I. S. 189—97.
10. Nature 23. 1881. S. 384—85.
11. 44. 1891. S. 279.
12. 45. 1892. S. 299—301.
13. 46. 1892. S. 90—92.
14. 49. 1894. S. 340—41.
15. 56. 1897. S. 71.
16. Engineering. 1881. 31. S. 15, 151.
17. Naturw. Rundschau 1892. S. 585.
18. C. Barus: U. S. Departement of Agriculture. Weather Bureau 1895.
19. Nature 49. 1894. S. 363—64.
20. Science 45. 1893.
21. N. S. 15. 1902. S. 175—78, 912—14.
22. N. S. 17. 1903. S. 32, 939.
23. Am. Met. Journal 9. 1893. S. 488—521.
24. Phil. Mag. (5) 38. 1894. S. 19—35.
25. (6) 1901. S. 572—78.
26. (6) 1902. S. 24—29, 262—69.
27. Sill. Journ. (4) 13. 1902. S. 473.
28. 14. 1902. S. 225—33.
29. 16. 1903. S. 325—27.
30. 17. 1904. S. 81—84.
31. 20. 1905. S. 297—301, 448—53.
32. Phys. Rev. 16. 1903. S. 385.

33. Presented at the Meeting of Americ. Physical Soc. April 25. 1903.
34. Smithonian Contributions Nr. 1309. 1901.
35. Nr. 1373. 1903.
36. W. v. Bezold: Sitz. Ber. d. Berl. Ak. d. Wiss. 1892. Seite 279—309.
37. Meteorol. Z.-S. 9. 1892. S. 321—36.
38. Bidwell: Chem.-News 40. 1879. S. 303.
39. 68. 1893. S. 286—89, 299—301.
40. Journ. of Roy. Inst. of Great Britain May. 5. 1893.
41. Nature 41. 1890. S. 219.
42. 42. 1890. S. 91, 151.
43. 49. 1894. S. 212—14, 388, 413.
44. Phil. Mag. (5) 29. 1890. S. 158—63.
45. Proc. Phys. Soc. 10. S. 325—333.
46. Bock: Programm z. Jahresberichte d. K. Realschule Rothenburg a. T. 1895/96.
47. Annalen d. Physik 68. 1899. S. 674 ff.
48. Die Bildung des Wassertropfens in der Atmosphäre. Bayr. Industrie- und Gewerbeblatt 1895.
49. Coulier: Journ. de Pharm. et de Chemie S. IV. 22. 1875. Seite 165—73, 254—55.
50. Chem. Cbl. 1876. S. 75.
51. Journ. chem. Soc. 1876. I. S. 186—87.
52. Arch. f. Pharm. VI. 1876. S. 76.
53. Donnan: Phil. Mag. (6) 3. 1902. S. 305—10.
54. Elster und Geitel: Met. Z.-S. 12. 1895. S. 187—88.
55. Beiblätter z. d. Annalen d. Physik 19. 1895. S. 874.
56. Guitard: Mech. Mag. 53. S. 346. Fortschritte d. Physik VI. und VII. 1850/51. S. 642.
57. Gunckell: Inaug.-Diss. Marburg 1905.
58. R. v. Helmholtz: Annalen der Physik 27. 1886. S. 508—43.
59. 32. 1887. S. 1—19.
60. Verh. d. phys. Ges. Berlin 1886. S. 20—21.
61. Naturw. Rundschau I. 1886. S. 69—71.
62. R. v. Helmholtz und F. Richarz: Annalen d. Physik 40. 1890. S. 161—203.
63. J. Kießling: Abh. d. Naturw. Vereins Hamburg-Altona 8. Abt. I. 1884.
64. Z.-S. f. physik. u. chem. Unterricht 1884.
65. 11. 1898. S. 19—23.
66. Gaea. 1884. S. 705—10.
67. Göttinger Nachr. 1884. S. 226—33.
68. Nachr. der K. Ges. d. Wiss. Göttingen 5. 1884. S. 122—125.

69. Meteorol. Z.-S. 1884. S. 117—126.
70. Die Dämmerungsersch. im Jahre 1883 und ihre physik. Erkl. Hamburg. 1885. L. Voß.
71. Mitt. d. Math. Ges. Hamburg 9. 1889. S. 289—91.
72. Bericht über d. 57. Vers. D. Natf. und Ärzte 1884. S. 293—300,
73. „ „ „ 59. „ „ „ „ „ 1886. S. 190.
74. Dämmerungserscheinungen. 1888. L. Voß, Hamburg.
75. Sitz.-Ber. der Ges. z. Bef. d. ges. Naturw. Marburg 1904. Nr. 6.
76. 1904. Nr. 7.
77. 1905. Nr. 3.
78. J. Kießling und E. Barkow: Verh. d. phys. Ges. Berlin VII. 1905. Nr. 1 und 2.
79. H. Lamb: Einl. in die Hydrodynamik. Deutsch von R. Reiff 1884.
80. W. Lemme: Inaug.-Diss. Greifswald 1901.
81. Mitt. d. naturw. Vereins Greifswald 33. 1901.
82. P. Lenard u. M. Wolf: Ann. der Physik 37. 1889. S. 443—56.
83. P. Lenard: Ann. d. Physik 63. 1897. S. 253—60.
84. Ann. d. Physik 1. 1900. S. 486.
85. 3. 1900. S. 298—319.
86. Lodge: Vortrag in Roy. Inst 28. May 1886.
87. La lumière électr. 14. 1884. S. 145—46.
88. Nature 24. 1882.
89. Journ. of Soc. chem. industry V. 1886. S. 572.
90. Lummer: Verh. d. Physik. Ges. Berlin 6. 1904. S. 142.
91. Mascart: Optique III. S. 403.
92. Notice sur les travaux scientifiques S. 40. 1878.
93. Meißner: Untersuchungen über den Sauerstoff, Hannover 1863.
94. Jahresber. d. Fortschritte d. Chemie 1863.
95. Nahrwoldt: Annalen d. Physik 5. 1878. S. 460—99.
96. 31. 1887. S. 448—74.
97. Electrotechn. Z.-S. 10. 1889. S. 383.
98. Rebenstorff: Physik. Z.-S.. V. 1904. S. 571—74.
99. Naturw. Rundschau 19. 1904. S. 629.
100. F. Richarz: Annalen d. Physik 59. 1896. S. 592—94.
101. Mitt. d. naturw. Ver. Greifswald 1896.
102. Sitz.-Ber. d. Ges. z. Bef. d. ges. Naturw. Marburg 1905. Nr. 6.
103. K. Schaum: Sitz.-Ber. d. Ges. z. Bef. d. ges. Naturw. Marburg 1902. Nr. 8.
104. Z. S. f. wiss. Photographie III. 1905. S. 239—41.
105. J. J. Thomson: Phil. Mag 1893 (5) 36. S. 313—27.
106. 1898 (5) 46. S. 528.
107. Electricitätsdurchgang durch Gase, Deutsch von E. Marx,

108. Anwendungen d. Dynamik auf die Physik und Chemie. 1890.
109. W. Thomson (Lord Kelvin): Phil. Mag (4) 42. 1871. S. 448
110. J. S. Townsend: Proc. Phil. Soc. Cambr. 10. 1899. S. 52—58.
111. A. Uhrig: Inaug.-Diss. Marburg. 1903.
112. Naturw. Rundschau 18. 1903. S. 601—13.
113. Verdet: Wellentheorie d. Lichts. Deutsch v. K. Exner 1881. Braunschweig, Vieweg-Sohn.
114. Vincent: Proc. of the Cambr. Phil. Soc. Vol. 12. Part IV. 1904.
115. Warburg: Sitz.-Ber. d. Akad. d. Wiss. Berlin 1901. S. 47.
116. C. T. R. Wilson: Phil. Trans. London. A vol 189. 1897. S. 265—307.
117. 192. 1899. S. 403—453.
118. 193. 1900. S. 289—308.
119. Proc. Roy. Soc. London 59. 1896. S. 338.
120. 61. 1897. S. 236—42.
121. 64. 1899. S. 127—29.
122. 65. 1899. S. 289—90.
123. 68. 1901. S. 151—161.
124. 69. 1902. S. 277—82.
125. Proc. Cambr. Phil. Soc. vol 9. Part 5. 1895.
126. vol 9. Part 7. 1897. S. 333—38.
127. vol 9. Part 8. 1898. S. 392—93.
128. Phil. Mag. (6) 7. 1904. S. 681.
129. Chem. News. 1898. S. 281—82.
130. Nature. 55. 1896/97. S. 622.
131. H. A. Wilson: Phil. Mag. April 1903.

Lebenslauf.

Am 10. März 1882 wurde ich, Erich Barkow, als Sohn des Lehrers H. Barkow in Elberfeld geboren. Ich besuchte zuerst die Elementarschule und dann das Gymnasium meiner Heimatstadt, das ich Ostern 1902 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um Mathematik und Naturwissenschaften zu studieren. Die ersten 3 Semester weilte ich in Marburg, das vierte in Berlin und kehrte Ostern 1904 wieder nach Marburg zurück. Das Examen rigorosum bestand ich am 7. März 1906.

Meine akademischen Lehrer waren in Marburg:

Cohen, Feußner, Hensel, Heß †, Jung, Kayser, Kohl, Korschelt, Kühnemann, Meyer, Natorp, Richarz, Schaum, F. A. Schulze.

In Berlin:

v. Bezold, Krigar-Menzel, Neesen, Planck, Schur, Schwarz, Starke, Warburg, Winnefeld.

Allen meinen hochverehrten Lehrern spreche ich meinen ehrerbietigsten Dank aus.

Die vorliegende Arbeit wurde im hiesigen physikalischen Institut angefertigt. Herrn Prof. Dr. J. Kießling †, dem ich die Anregung zu dieser Arbeit verdanke, und der mich bei ihrer Ausführung mit Rat und Tat unterstützt hat, werde ich ein dauerndes Andenken bewahren. Herrn Prof. Dr. F. Richarz danke ich auch an dieser Stelle für das meinen Untersuchungen stets entgegengebrachte fördernde Interesse. Ebenso danke ich Herrn Prof. Schaum für seine freundlichen Ratschläge bei Abfassung dieser Arbeit.

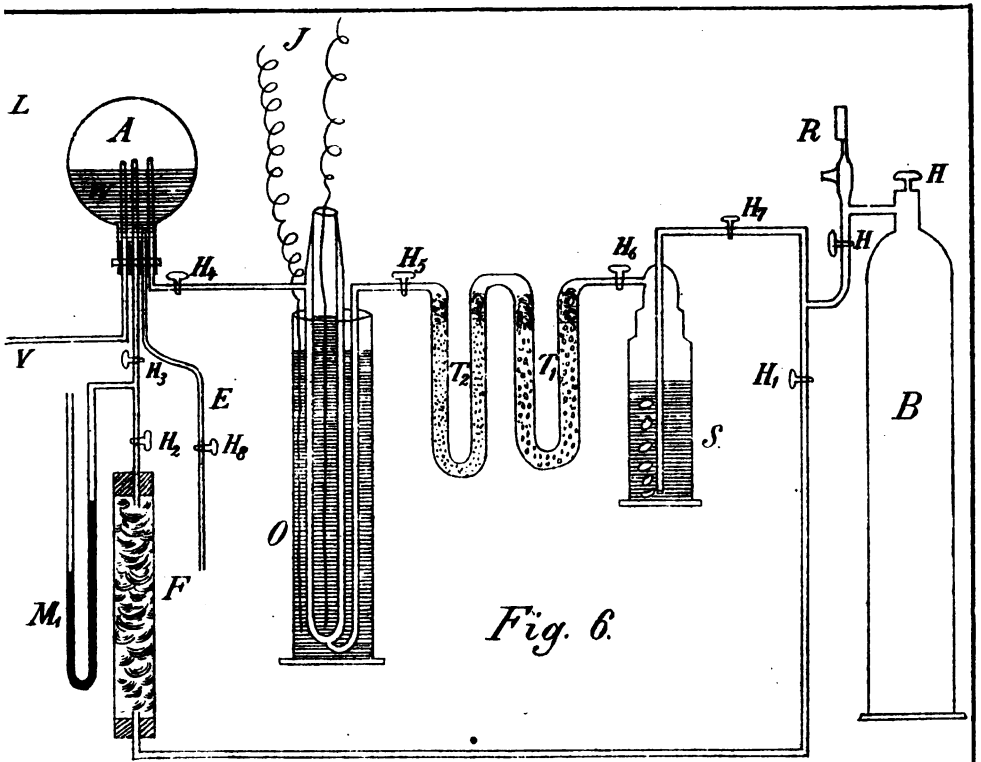


Fig. 6.

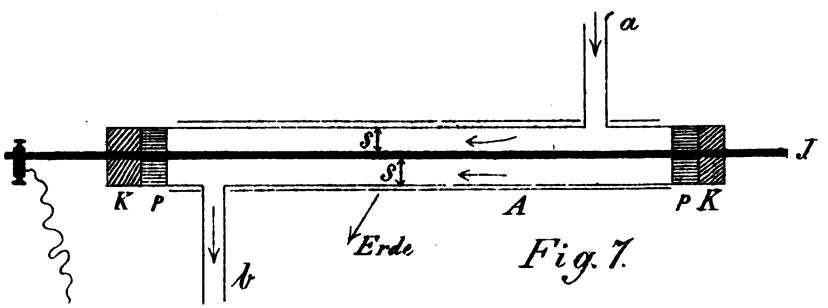


Fig. 7.

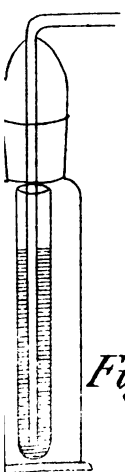


Fig 8.

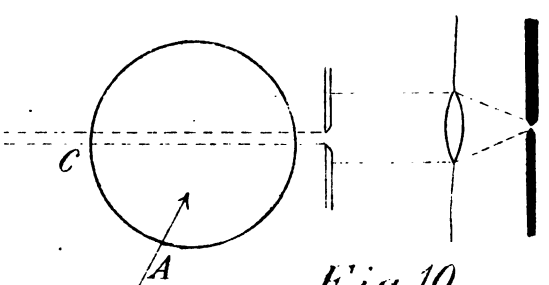


Fig. 10.

THIS BOOK IS DUE ON THE LAST DATE STAMPED BELOW

AN INITIAL FINE OF 25 CENTS

WILL BE ASSESSED FOR FAILURE TO RETURN THIS BOOK ON THE DATE DUE. THE PENALTY WILL INCREASE TO 50 CENTS ON THE FOURTH DAY AND TO $1.00 ON THE SEVENTH DAY OVERDUE.

NOV 26 1937

SEP 14 1938

24Feb'64SP

RECEIVED

APR 17'64-4PM

LD 21-95m-7,'37

Barkow
186886
QC929
F7B3